19RTRP
-C12819
8-03

최종보고서
저감 후드 기술 개발
고속화철도(250km/h이하) 터널 미기압파

2020

국토교통과학기술진흥원
국토교통부

보안 과제( ), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개( ) 발간등록번호()

철도기술연구사업 최종보고서

R&D / 19RTRP-C128198-03

고속화철도(250km/h이하) 터널 미기압파 저감 후드 기술개발 최종보고서

2020. 08.

주관연구기관 / 한국철도기술연구원
공동연구기관 / ㈜에이맥스
위탁연구기관 / 안동대학교
위탁연구기관 / ㈜비엔텍아이엔씨
위탁연구기관 / 부산대학교

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

'고속화철도(250km/h이하) 터널 미기압파 저감 후드 기술개발'(연구개발 기간 : 2017 04 01 ~ 2020 06.30) 과제의 최종보고서를 제출합니다

2020. 08.

주관연구기관명 : 한국철도기술연구원 (대표자) 나 희 승 (인)

공동연구기관명 : 주식회사 에이맥스 (대표자) 김 애 숙 (인)

위탁연구기관명 : 안동대학교 산학협력단 (대표자) 이 혁 재 (인)

위탁연구기관명 : ㈜비엔텍아이엔씨 (대표자) 이 호 석 (인)

위탁연구기관명 : 부산대학교 산학협력단 (대표자) 최 경 민 (인)

주관연구기관책임자 한국철도기술연구원 김 동 현
공동연구기관책임자 주식회사 에이맥스 이 혜 원
위탁연구기관책임자 안동대학교 김 회 동
위탁연구기관책임자 ㈜비엔텍아이엔씨 이 호 석
위탁연구기관책임자 부산대학교 김 동 진

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>19RTRP-C128198-03</td><td>해당 단계
연구 기간</td><td colspan="2">2017. 04. 01 -
2020. 06. 30</td><td>단계구분</td><td>1/1</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="5">철도기술연구사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="5">-</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="5">-</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="5">고속화철도(250㎞/h이하) 터널 미기압파 저감 후드 기술개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">김동현</td><td>해당단계
참여연구원 수</td><td>총: 32명
내부: 32명
외부: 명</td><td>해당단계
연구비</td><td>정부: 4,685,000천원
민간: 1,600,000천원
정부외: 천원
상대국: 천원
계: 6,285,000천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간
참여연구원 수</td><td>총: 32명
내부: 32명
외부: 명</td><td>총 연구비</td><td>정부: 4,685,000천원
민간: 1,600,000천원
정부외: 천원
상대국: 천원
계: 6,285,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소속 부서명</td><td colspan="3">한국철도기술연구원
하이퍼튜브연구팀</td><td colspan="3">참여기업명
(주)에이맥스</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명:</td><td colspan="3">상대국 연구기관명:</td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td colspan="3">연구기관명: 안동대학교
㈜비엔텍아이엔씨
부산대학교</td><td colspan="3">연구책임자: 김희동
이호석
김동진</td></tr>
<tr><td colspan="7">※ 국내・외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 갈음</td></tr>
<tr><td>연구개발성과의
보안등급 및
사유</td><td colspan="6"></td></tr>
</table>

9대 성과 등록・기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설・장비	기술요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록・기탁 번호											

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설・장비 현황

구입기관	연구시설・장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

	보고서 면수

요약문

연구의 목적 및 내용	■ **연구목표** - 콘크리트궤도 적용, 터널단면적 축소, 열차의 고속화 추세에 따른 터널 미기압파에 효과적으로 대처 가능한 터널 미기압파 저감 후드 및 허용기준 개발 ■ **연구개발 내용** ○ **미기압파 허용기준 마련** - 국내·외 허용기준, 기존/신규터널 미기압파 발생현황 조사 및 DB 구축 - 국내외 현장시험 데이터 분석 - 국내 고속열차 차량 특성, 터널형상, 터널 주변 지형환경 및 기후조건에 대한 미기압파 민감도 분석(3차원 방사패턴, 주파수 특성 등) - 터널 미기압파 허용기준(안) 마련, 설계지침(KR코드) 반영 - 관련 법·제도 제·개정 필요성 검토 ○ **미기압파 저감 후드 개발** - 열차속도, 터널단면적, 터널연장 등 주요 인자를 고려한 조건별 최적 후드 표준사양 개발 - 축소모델 주행시험 및 3차원 CFD 해석을 통한 후드 설계 - 터널 공용중 설치 가능한 시공법 개발 - 테스트베드 선정 및 대표 타입 후드 풀-스케일 시제품 제작 - 현장 테스트베드 시험시공 및 모니터링을 통한 성능검증 - 후드 구조체 제작 및 운영 매뉴얼 개발 - 열차 및 터널 제원 등 주요 인자를 고려한 터널 미기압파 예측 및 시뮬레이션 S/W 개발 - 연구성과의 적용가능성 등을 고려한 경제성 분석
연구개발성과	- 운행속도, 터널연장, 터널단면적 등을 고려한 터널 미기압파 저감 후드 표준사양 및 모델 - 터널 미기압파 예측 역해석 S/W - 신선 및 운행 중 철도노선에서의 후드 설치 시공·시방서 - 국내 터널 미기압파 DB - 터널 미기압파 폭발음 허용기준(안), 절차서, 해설서 - 후드 구조체 제작 및 운영 매뉴얼 - 경제성 평가 결과
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	■ **활용계획** ○ **터널 미기압파 저감 후드 기술이전** - 철도신선 중 테스트베드를 선정하여 시운전시험 전 설치하여 성능검증 후, 중부내륙선, 동서고속철도, 남부내륙선, 동해선, 경전선 등의 철도터널 설계에 반영 ○ **터널 미기압파 관리기준 신규 제정** - 철도설계의 기술기준 또는 설계지침(KR코드)에 반영하여 신규터널 설계 시 적용 ■ **기대효과** - 터널 입/출구 주변 민가의 폭발음의 소음·진동 관련 민원 저감 - 터널 진입 시 감속이 없어지므로 열차 평균속도 상승, 소요시간 단축으로 고객 만족도 향상 - 기존철도 고속화인 경우에, 내공단면적을 확폭하지 않고 터널 갱구에 미기압파 저감 후드 설치 - 세계 최고 수준인 일본 신칸센 미기압파 저감 후드보다 미기압파 저감 성능이 34% 더 뛰어나고, 시공성과 적용성이 우수한 한국형 미기압파 저감 후드의 원천기술 상용화 - 같은 성능에서 기존 후드 구조체보다 후드 길이에서 약 1/3 크기로 짧아진 후드 구조체 상용화 (후드 구조체 제작 시공비 1/3~1/2 절감)

국문핵심어 (5개 이내)	터널	미기압파	고속철도	폭발음	후드
영문핵심어 (5개 이내)	tunnel	micro pressure wave	high speed railway	explosion sound	hood

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 8

1.1 연구개발의 개요 ····· 8

가. 연구의 배경 ····· 8

나. 기술의 정의 ····· 9

1.2 연구개발 대상의 국내외 현황 ····· 9

가. 국외 터널 미기압파 저감 후드 현황 ····· 9

나. 국내 터널 미기압파 저감 후드 현황 ····· 11

1.3 연구개발의 중요성 ····· 12

1.4 연구개발의 목표 및 내용 ····· 13

가. 연구개발의 최종 목표 ····· 13

나. 연차별 연구개발 목표 및 내용 ····· 14

2. 연구수행내용 및 성과 ····· 16

2.1 고속화철도(250km/h이하) 터널 미기압파 저감 후드 기술개발 ····· 16

가. 후드 구조체의 미기압파 저감 최적설계 방법 적합성 ····· 16

나. 열차속도, 터널단면적, 터널연장별 등 주요인자를 고려한 최적후드 표준사양 개발 ····· 36

다. TEST-BED에서의 후드 구조체의 미기압파 저감 성능 ····· 54

라. 터널들의 미기압파 영향 DB 구축 ····· 82

마. 미기압파 허용기준(안)과 절차서 및 해설서 ····· 97

바. 터널 미기압파 예측 역해석 프로그램(S/W) 개발 ····· 110
사. 후드 구조체 적용 경제성 평가 ····· 123
2.2 250km/h급 2세대 후드의 구조 안정성 및 시공성 향상 기술개발 ····· 132
가. 후드 구조체의 구조해석/평가 ····· 132
나. TEST-BED 후드 구조체 제작 매뉴얼 ····· 136
다. 공용중 시공 방법의 적합성 ····· 144
라. 철도시스템(궤도, 전기, 신호 등)의 인터페이스 경합요건 검토 ····· 148
마. 후드 구조체의 시작품 제작 시공 ····· 153
바. 후드 구조체 시공 모니터링 ····· 164
사. TEST-BED 후드 구조체의 시험/평가 ····· 170
아. 고속화철도용 최적설계 도면작성 ····· 177
자. 후드 구조체 운영 및 유지보수 매뉴얼 최종안 작성 ····· 183
2.3 국내 고속열차 차량 특성과 철도터널 주변 환경에 대한 미기압파 민감도 연구 ····· 185
가. 터널 출구갱문형상에 따른 미기압파의 3차원 방사패턴 분석/평가 ····· 185
나. 국내 터널 상세사양에 따른 미기압파의 주파수특성 분석/평가 ····· 193
다. 미기압파가 주변의 민가/기타 구조물에 미치는 영향 분석/평가 ····· 197
2.4 250km/h급 2세대 후드의 공기역학적 성능평가 및 모니터링 기술개발 ····· 209
가. 3D CFD해석에 의한 고효율 후드 구조체의 공기역학적 성능평가기법 개발 ····· 209
나. 본선 TEST-BED 터널 및 시험용 후드 구조체의 중앙 모니터링 S/W 작성 및 구축 ····· 214

다. 본선 TEST-BED 및 신규노선 터널들의 사양, 사갱, 기재갱, 터널 주변민가 및 이격거리 도면화, 데이터베이스화 ····· 220
라. 터널 단면적 축소에 따른 예상문제점 분석 ····· 223
2.5 실용화를 위한 연구성과 홍보 ····· 233
가. 홍보물 제작 및 배포 ····· 233
나. 기술박람회 홍보부스를 통한 연구성과 홍보 ····· 236
다. 포상을 통한 연구성과 홍보(2019-2020) ····· 236
2.6 연구실적 ····· 237
가. 논문 게재 ····· 237
나. 논문 발표 ····· 238
다. S/W 등록 ····· 239
라. 특허 등록 ····· 240
마. 시작품 제작 ····· 240
바. 현장시험 ····· 240
사. 설계기준 ····· 241
아. 기술실시계약 ····· 241
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 242
3.1 목표 달성도 ····· 242
가. 연구 목표 ····· 242
나. 당해연도 성과목표 달성도 ····· 243
다. 3년간 최종 성과목표 달성도 ····· 245
3.2 관련 분야 기여도 ····· 247
가. 철도터널 단면적 설계 기여도 ····· 247
나. 터널 미기압파 폭발음 환경영향 평가 기여도 ····· 247

다. 고속철도 차량의 전두부와 유효단면적 설계 기여도 ····· 247
라. 철도터널 내부 사갱풍도 설계 기여도 ····· 248
마. 철도 운영계획 분야 기여도 ····· 248

4. 연구개발성과의 활용 계획 등 ····· 249

4.1 국내 고속화철도 건설사업에 활용 ····· 249

가. 기존선 고속화 개량계획에 활용 ····· 249
나. 신규 고속화철도 건설사업에 활용 ····· 249
다. 연구개발성과 활용 계획 상세 ····· 250

4.2 해외 고속철도 시장진출 ····· 251

가. 해외 고속철도 시장진출 ····· 251

붙임. 참고 문헌 ····· 253

1. 연구개발과제의 개요

1.1 연구개발의 개요

가. 연구의 배경



<그림 1.1.1 터널 미기압파(폭발음) 방사현상>

○ 고속열차가 터널에 진입할 때 압력파가 생성되어 터널의 끝을 향하여 음속으로 전파됨. 이러한 압력파의 일부분은 충격성 소음/진동의 형태로 터널 출구로부터 외부로 방사되는데 이를 미기압파(micro-pressure wave, sonic boom)라고 부르며, 터널 근처의 민가에서는 폭발음의 환경소음과 함께 심한 저주파 진동을 느끼게 됨.

○ 고속철도에서 터널 단면적을 매우 크게 적용하면 미기압파 문제를 해결할 수 있으나, 터널 건설비가 크게 증가하게 됨.

○ 터널 미기압파를 저감할 수 있는 기술로는 발라스트 궤도를 적용하는 방법, 터널에 수직갱이나 사갱을 적용하는 방법, 터널내 기재갱을 이용하는 방법, 고속열차 전두부를 미기압파 저감 형태로 적용하는 공기역학적 기술, 터널 입/출구에 공기역학적으로 최적 설계된 “미기압파 저감 후드 구조체”(hood, 완충공)를 설치하는 기술 등이 있음.

○ 열차 하중과 유지보수 문제로 궤도 도상을 발라스트 궤도에서 콘크리트 궤도로 바뀌고 있는 추세이며, 궤도도상에 흡음 블럭을 적용하는 문제는 설치비와 유지보수의 어려움이 있음.

○ 터널내 수직갱, 사갱, 기재갱 등의 활용은 기존 토목시설물을 활용하는 것으로 한계가 있으며, 미기압파를 저감시키기 위하여 추가적인 “사갱내 풍도” 설치는 비용적인 문제에 부딪히게 됨.

○ 고속열차 전두부에 의한 미기압파 저감은 첫 번째 차량의 운송효율문제[1]로 전두부의 길이를 12m 내외로 한정되어 미기압파 저감효과가 최대 10%~15% 정도임.

※ 주 1: 운송효율문제 - 동력분산식 고속열차의 경우에 첫 번째 차량의 객실 좌석 수 확보문제

○ 비용적인 측면과 유지보수적인 측면에서 가장 효율적인 방법은 터널 갱문에 터널 미기압파 저감 후드 구조체를 적용하는 기술로 알려져 있음.

나. 기술의 정의

○ 철도터널 갱구(portal)에서 외부 민가 쪽으로 방사되는 ‘폭발음과 저주파 진동’을 일본에서는 ‘미기압파(micro pressure wave)‘라고 칭하고, 유럽과 미국에서는 ‘소닉-붐(sonic boom)’이라 명명함.

○ 터널 출구의 미기압파를 저감시키기 위하여 터널 입구에 설치하는 ‘후드 구조체’는 고속열차가 터널진입 시 상승하는 ‘압력구배(dp/dt)’를 저감시키는 방식을 사용함.

○ 일본의 창문형과 독일의 슬롯형 ‘1세대 후드 구조체’와 본 기술개발의 열차진행방향에 평행한 통풍관을 형성하는 ‘2세대 후드 구조체’로 분류할 수 있음.

1.2 연구개발 대상의 국내외 현황

가. 국외 터널 미기압파 저감 후드 현황

○ 2005년 이후 유럽과 일본, 중국, 대만, 미국 등의 신규 고속선 들이 발라스트 궤도에서 콘크리트 궤도로 바뀌고 개통됨에 따라, 콘크리트 궤도의 공기역학적 특성 때문에 터널 갱구에서 발생되는 폭발음을 저감시키기 위하여 공기역학적으로 설계된 후드를 터널갱구에 설치하고 있음.

※ 일본의 경우는 1975년부터 콘크리트 궤도를 철도터널에 적용하여, 터널출구 폭발음에 대한 공기역학적 설계의 터널 갱구후드를 처음 개발

○ 철도터널 내에 콘크리트 궤도를 적용하는 일본, 중국, 독일, 프랑스, 대만, 미국(캘리포니아 고속철도 설계사양서, 2012년) 등에서는 터널 출구 미기압파 폭발음을 45년 동안의 현장시험 및 개선 경험치인 일본의 허용기준을 준용

○ 일본의 경우 철도터널 미기압파 저감을 위해 터널 연장별로 터널갱구에 20m에서 50m에 걸쳐 후드 구조체를 개발하여 설치(45% 저감)하고, 고속열차 전두부(train nose)가 미기압파를 부가적으로 저감(15% 저감)할 수 있는 형상으로 개발하여 철도시설물 구조체와 열차 전두부에 의하여 효율적으로 미기압파를 저감하고 있음(일본철도총합연구소).

○ 독일은 2006년도의 Nuremberg-Ingolstadt 신선에서 콘크리트 궤도인 터널에서 미기압파 문제의 심각성을 인식하고, ICE 신선에 적용할 터널 미기압파 저감 후드를 개발 선정하기 시작하였음. 독일 DB에서 2008년 이후, 카젠버그 터널(Katzenberg Tunnel, 8km) 갱구에 환기슬롯 포탈 돔 형태의 후드를 개발 설치하여 터널 출구 미기압파를 50% 저감시키고, 독일 항공우주연구소(DLR)에 의해 개발된 슬릿형 후드를 신규 고속선 터널 갱구에 보급.

○ 프랑스와 스페인 국경에 위치한 Perthus 터널은 연장이 8.3km이고 2010년 12월에 상업운행을 시작하였음. Perthus 터널은 콘크리트 궤도을 적용한 단선병렬터널이고, 여객열차와 화물열차 혼용 노선임. Perthus 터널의 양쪽 갱구에는 “창문형의 미기압파 저감

후드”를 각각 2개소씩 설치하였음. 프랑스는 국토의 대부분이 평야지대이지만 국경근처의 산악지대 철도터널에는 터널 내공단면적 최적화와 더불어, 터널출구 미기압파를 저감시키기 위하여 터널입구 후드를 적용하고 있음.

○ 중국의 최고속도 200km/h의 일반철도 신선에 설치된 터널 미기압파 저감 후드는 일본 신칸센의 창문형 후드를 설치하였음. 200km/h급 신선과 300km/h급 신선에 터널 미기압파 저감 후드를 광범위하게 적용하였음. 200km/h급 노선으로 터널입구 후드가 설치된 송린바오(Songlinbao) 터널은 단선터널(내공단면적 48m^2)이며, 터널 진입속도가 160km/h임. 송린바오 터널 등이 있는 “수이유 고속철도(遂渝高速铁路)”는 200km/h급 노선임.

○ 대만 고속철도는 최고 운행속도가 300km/h(설계속도 350km/h)이고, 터널 단면적은 90m^{2}이고, 시종점역 가까이나 300km/h 운행속도를 낼 수 없는 구간은 터널 단면적을 80m^{2}이하까지 축소하여 건설함. 대만 고속철도는 터널 내공단면적 90m^{2}와 콘크리트 궤도 채택에 따른 영향으로 터널 미기압파가 발생함. 이에 대한 저감대책으로 3km 이상의 터널과 터널연장 3km 이하인 경우에도 터널갱구 주변에 민가가 있는 경우에는 미기압파 저감 후드를 설치함.



〈그림 1.2.1 국외 고속철도에 설치된 터널 미기압파 저감 후드 비교〉

〈표 1.2.1 세계 각국의 고속열차 선두차량의 투영단면적 비교〉

열차 종류	영업 최고속도	이층열차 여부	선두차량 투영 단면적(㎡)	추진 방식
KTX	300km/h	Single Level	9.87	동력 집중식
KTX-산천	300km/h	Single Level	10	동력 집중식
KTX-III(HEMU-430X)	370km/h	Single Level	11.87	동력 분산식
EMU-250	250km/h	Single Level	10.89	동력 분산식
신칸센 300계	270km/h	Single Level	11.40	동력 분산식
신칸센 500계	300km/h	Single Level	10.20	동력 분산식
신칸센 N700계	260km/h	Single Level	10.97	동력 분산식
독일 ICE3	330km/h	Single Level	10.40	동력 분산식
프랑스 AGV	360km/h	Single Level	10.50	동력 분산식

○ 세계 각국 고속열차 선두차량의 투영단면적을 비교하였을 때 앞으로 250km/h이하 신선에 투입될 동력분산식의 국내차량(EMU-250)이 터널 미기압파 저감에 유리한 상황이 아님(터널단면적 대비 차량단면적 비율이 중요).

나. 국내 터널 미기압파 저감 후드 현황

○ 호남고속철도 400km/h급 증속구간인 우산터널 시점에 “한국형 터널 미기압파 저감 후드”를 한국철도기술연구원에서 기술이전 설치완료 하였음(2013년 8월 20일 완공).

○ 1999년도에 철도기술연구원에서 원천기술 개발하여 국내특허 등록된 한국형 통풍관형 후드는 국내특허만 출원하여 기술수출이 불가능함.

○ 호남고속철도 400km/h 증속구간에 설치된 미기압파 저감 후드는 우산터널(연장 320m, 터널단면적 96.7m^2)의 상선 입구에 설치되어 있으며, 400km/h 운행용 후드임.

○ 400km/h 운행용 후드는 한국철도시설공단에서 설계 의뢰로 시험 적용된 1세대 후드이고, 터널 미기압파 허용기준에 대해서는 터널 갱구 중심에서 외부로 20m 위치에서 50Pa 이하임. 후드 구조체에 대한 설계기준은 열차풍하중에 대하여 2,500Pa 기준을 적용하였음. 기타 설하중, 태풍하중 등은 일반 구조물에 대한 관련 기준(건축구조기준 KBC2009 (국토교통부 제2009-1245호))을 준수하였음.



<그림 1.2.2 호남고속철도의 400km/h급 증속구간 우산터널(연장 320m)의 터널 입구 후드>

○ 운행속도 200km/h 이상의 고속철도에서 터널 미기압파 저감 후드 대책은 시공비가 저렴하며, 궁극적으로 최적설계의 터널 단면적에서 적용되기 때문에 최선의 터널 건설비 절감 방법임.

○ 국내의 경우는 2014년도에 한국철도기술연구원(이하 철도연)에서 공기역학적으로 축소모델 주행시험으로 개발한 차세대 후드 원천기술 3종이 표준형 크기(길이방향 25m급)에서 최대 72%의 미기압파 저감 성능을 확보(기술성숙도 실험실수준 TRL 4단계 원천기술 확보, 3극 특허로 국제특허 등록, 2016년).

1.3 연구개발의 중요성

<표 1.3.1 주요국의 터널 미기압파 허용기준 채택과 저감대책>

구 분	우리나라			일본 큐슈 신칸센[1] 홋카이도 신칸센[1]	독일	중국
	경부고속	호남고속	중앙선			
터널단면적[2] (㎡)	107(복선)	96.7(복선)	68(복선) 40(단선)	61 (복선)	60.5(단선)	48.6(단선)
운행속도 (㎞/h)	300	300	250	260	250	200
폭발음 허용기준	없음	없음	없음	있음	있음	있음
후드 저감 시설 설치	없음	없음	없음	있음	있음	있음

※ 일본 기준이 국제기준으로 적용 중(터널 출구 20m 지점에서 50Pa 이하, 민가 근방(보안물건)에서 20Pa 이하)
※ 주 1 최근에 건설된 일본 신칸센 신선은 터널단면적 61m^2를 적용함
※ 주 2 UIC 779-11의 터널 단면적 정의 적용함

○ 최근 건설하는 철도터널의 경우 건설비 절감 등을 위해 단면을 축소하고, 열차는 고속화 추세로 이에 따른 미기압파로 인한 민원 발생 우려가 높음.

○ 현재 설계중인 200km/h급과 250km/h급 신규철도 대부분은 국내에서 처음으로 최소단면적의 터널로 설계되고 있어 향후 미기압파에 따른 민원급증 예상되며,

※ 중앙선 도담-영천, 포항-삼척 노선 등은 건설비 절감을 위해 터널단면적을 최소내공단면적(단선 40m^2)으로 설계/건설 중

○ 터널 준공 후 공용 중인 터널에 후드를 설치하게 될 경우 공사비가 5~6배 더 소요되고 차선과의 간섭 문제 등 야기 우려되므로 설계단계에서부터 미기압파 문제 고려 필요

○ 제2차 국가철도망 구축계획(2011~2020) 및 제2차 철도산업발전 기본계획(2011~2015)에 따른 기존 노선 및 신설 노선의 고속화에 부합

※ 일반철도를 신호, 전차선 등 일부 시설개량을 통해 선형조건에 따라 230km/h 또는 250km/h내외로 고속화

○ 터널 출구에서 방사되는 미기압파는 소닉 붐(sonic boom)으로 대부분이 저주파 성분이기 때문에 선로변의 방음벽 시설로 저감시키거나 막을 수 없음. 최근 2005년 이후 유럽과 일본, 중국, 대만 등의 신규 고속철도들은 발라스트 궤도에서 콘크리트 궤도로 바뀌어 개통되고 있는데, 콘크리트 궤도의 공기역학적 특성 때문에 전부 터널입구에 미기압파 저감 후드(hood)를 설치하고 있음.

○ 운행속도 200km/h 이상의 고속철도에서 터널 미기압파 저감 후드 대책은 시공비가 저렴하며, 궁극적으로 최적설계의 터널 단면적에서 적용되기 때문에 최선의 터널 건설비 절감 방법임.

○ 국내에 소단면 터널의 미기압파 현상에 대한 현장데이터가 전혀 없는 현실이며, 미기압파 저감 후드의 성능에 대해서는 국내 현장시험 데이터가 전무한 실정

- 미기압파 발생에 대한 변수를 예측하기 위해서는 실제 운행중인 노선에 대하여 많은 횟수의 현장실측을 통하여 데이터를 축적하고 분석함으로서 발생 경향 및 변수에 따르는 종속인자를 파악하는 것이 중요함.
- 이를 위하여 터널 현장 모니터링 시스템이 필요하며, 모니터링된 데이터를 활용하여 불완전한 해석기법을 보완하여 예측기술을 완성할 수 있음.

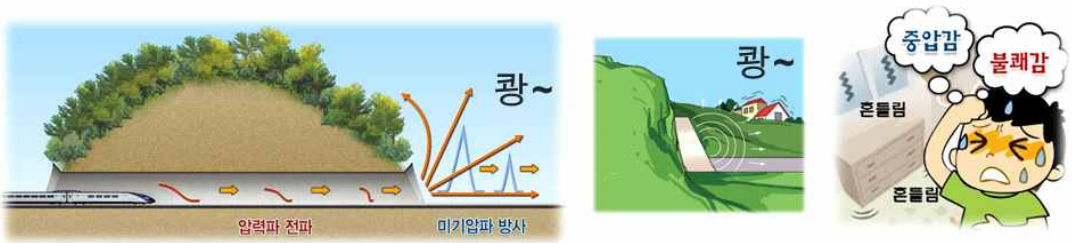
○ 현재 철도 선진국은 미기압파 저감 후드의 현장적용 효과에 대해서 정확한 현장데이터를 확보하고 있으며, 국가별로 터널의 형식 및 내부구조, 열차의 형태 등이 상이하여 각 국마다 미기압파의 발생형태가 다양하게 발생하여, 우리나라에서도 현실에 맞는 데이터 취득 및 미기압파 저감 후드의 성능평가가 정량적으로 이루어져야만 국내 보급뿐만 아니라 해외로의 기술이전 및 수출 등이 가능함.

1.4 연구개발의 목표 및 내용

가. 연구개발의 최종 목표

구 분	내 용
최종 목표	콘크리트궤도 적용, 터널단면적 축소, 열차의 고속화 추세에 따른 터널 미기압파에 효과적으로 대처 가능한 터널 미기압파 저감 후드 및 허용기준 개발
세부 목표	- 터널 미기압파 DB 구축 - 미기압파 시뮬레이션 역해석 S/W 개발 - 국내 실정에 부합하는 미기압파 허용기준 마련 - 조건별 최적 후드 표준사양 개발 및 성능검증 ※ 미기압파 저감성능 60%, 해외 제품(일본) 대비 제작·설치비 약 2/3 수준 - 미기압파 저감 후드 설치·시공법 개발

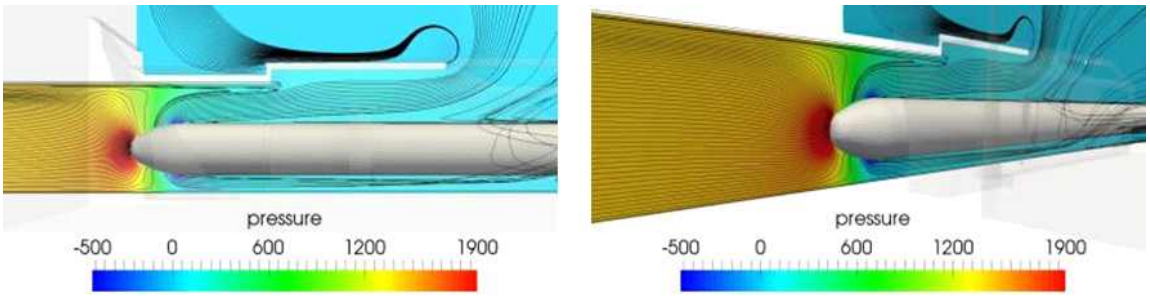
□ **최종목표 설정 근거**



<그림 1.4.1 터널 미기압파(폭발음)가 민가에 미치는 영향>

○ 고속열차가 터널에 진입할 때 압력파가 생성되어 터널의 끝을 향하여 음속으로 전파

○ 이러한 압력파의 일부분은 충격성 소음/진동의 형태로 터널 출구로부터 외부로 방사되는데 이를 미기압파(sonic-boom)라고 부르며, 터널 근처의 민가에 폭발음의 환경소음과 함께 심한 저주파 진동을 발생



<그림 1.4.2 고속열차의 터널 진입에 따른 압력파 생성>

○ 국내에서 운행되는 경부고속철도와 호남고속철도, 강릉선에서는 대단면의 터널단면적을 적용하여 그 동안 터널 미기압파 문제에 관심을 가지지 않았지만, 현재 설계되고 있는 신규 고속철도는 전부 소단면 철도터널과 콘크리트궤도를 적용하기 때문에 터널 미기압파 문제에 대한 대책이 필요하게 되었음.

나. 연차별 연구개발 목표 및 내용

구분	연구개발목표	연구개발내용 및 방법
1차년도	• 2세대 후드의 핵심성능 통합설계 • 공용중 후드 시공법 개발 • 원강선 TEST-BED 터널들에서 미기압파 현장시험 계측시스템 구축 및 신뢰도 확보 시험	◦ 국내·외 허용기준, 기존/신규터널 미기압파 발생현황 조사 및 DB구축 ◦ 국내외 현장시험 데이터의 분석으로 미기압파 예측 경험식의 경험상수 평가 및 S/W 제작 기본설계 ◦ 초고속 터널주행 열차모델 시험장치에 1/60축척 후드 및 터널 모형 설계/제작, 후드 구조체 공기역학 최적설계 및 성능평가(1) ◦ 후드 구조체의 복합소재 조사 및 검토 ◦ 터널 출구갱문 형상에 따른 미기압파 3차원 방사패턴 분석 및 평가 ◦ 터널입구후드의 CFD 해석기법 개발 ◦ 공용중인 철도노선에서의 터널입구 후드의 시공법 개발 ◦ 원강선 TEST-BED 터널에서의 1차 공기역학 계측 예비시험 ◦ 후드 구조체의 스타일링 산업디자인 수행, 1/60축척 1차 시작품 제작 ◦ TEST-BED 현장시험 계측장치 및 중앙모니터링 무선전송시스템 사양 및 시스템설계 ◦ 2세대 후드의 기술가치 평가에 의한 경제성 분석 ◦ 오송시험선 TEST-BED에 후드 기초 시공 및 갱문 안전성 검토 실시
2차년도	• 오송시험선 TEST-BED에 시작품 제작, 시험시공, 성능평가 시스템 구축 • 원강선 TEST-BED 터널들에서 미기압파 현장시험 DB구축	◦ 후드 구조체의 슬림화 구조 검토 및 적용성 평가 ◦ 초고속 터널주행 열차모델 시험장치에 의한 TEST-BED 사양의 1/60축척 사갱 및 기재갱의 공기역학 성능평가, 2세대 후드 구조체의 공기역학 최적설계 및 성능평가(2) ◦ 실물 스케일 후드 구조체 시작품을 본선 TEST-BED에 구축 ◦ TEST-BED 터널 현장시험 계측장치 구축 및 평가기술 개발 ◦ TEST-BED 현장시험의 장거리 중앙 모니터링시스템/서버 구축 ◦ 터널에 대한 1차 공기역학 계측/평가(TEST-BED에서 신뢰도확보 예비시험) ◦ 국내 터널내 상세사양에 대한 방사 미기압파의 주파수특성 분석/평가 ◦ 터널입구후드의 CFD 해석과 중앙 모니터링 서버용 S/W 개발 ◦ 후드 구조체의 안정성 모니터링 계측시스템 구축

3 차 년 도	• TEST-BED에서의 후드 구조체 현장 성능검증, 안정성 향상 • 오송 시험선 TEST-BED 터널들에서 미기압파 DB 구축 • 미기압파 예측 SW 제작 • 미기압파 허용기준(안) 마련	◦ 본선 TEST-BED 현장시험의 장거리 중앙 모니터링시스템 운영 ◦ 터널, 주변 민가 및 후드에 대한 계측/평가(TEST-BED 현장시험) ◦ 터널 미기압파의 국내 민가특성에 미치는 영향 평가 ◦ 터널들 및 후드 구조체에 대한 중앙 모니터링 빅데이터 분석/처리 ◦ 후드 구조체 안정성 향상 기술개발 ◦ TEST-BED 현장시험 데이터 분석으로 미기압파 CFD 역해석 성능검증 ◦ 1/60축척 주행시험에 의한 2세대 후드 구조체의 공기역학적 최적설계 및 성능평가 업데이트(현장시험의 현장여건 반영) ◦ 주변민가에 미치는 터널 미기압파 예측 상용화 역해석 S/W 개발 ◦ 고속화철도 터널 미기압파 허용기준의 지원 및 개정(안) 마련 ◦ 관계부처와 터널 미기압파 허용기준(안) 및 해설서 자문/조정 및 협의 ◦ 최종보고서 작성/제출

□ 기술개발의 TRL에 근거한 연구개발 단계(장비 · 장치 유형)

구분		표기	단계별 설명(장비·장치 유형)
기초연구 단계	TRL 1	□	기본적인 과학 원리 관찰 및 파악 단계 (순수이론단계)
	TRL 2	□	기술적 응용개념 또는 아이디어 형성 단계
실험 단계	TRL 3	□	해석적 연구와 실험적 연구를 통한 개별 요소의 기능과 특성 정립 단계
	TRL 4	□	실험실 환경에서 장비/장치 모델 또는 시제품의 성능 및 신뢰성 평가 단계
시작품 단계	TRL 5	■	유사 환경에서 장비/장치 모델 또는 시제품의 성능평가 및 신뢰성 시험단계
	TRL 6	■	유사 환경에서 장비/장치 프로토타입 모델의 성능 및 신뢰성 평가 단계
실용화 단계	TRL 7	■	장비/장치 프로토타입 모델의 실제현장 사용가능성 증명 단계
	TRL 8	■	장비/장치 완제품의 제한된 실제현장 사용가능성 증명 단계
사업화 단계 (기술이전 사업)	TRL 9	□	장비/장치완제품의 실제현장에서 사용 적합성 증명단계

※ 본 연구과제는 TRL 5 ~ TRL 8의 기술개발을 수행하였음.

2. 연구수행내용 및 성과

2.1 고속화철도(250km/h이하) 터널 미기압파 저감 후드 기술개발

가. 후드 구조체의 미기압파 저감 최적설계 방법 적합성

(1) 초고속 열차모델 터널 주행시험장치

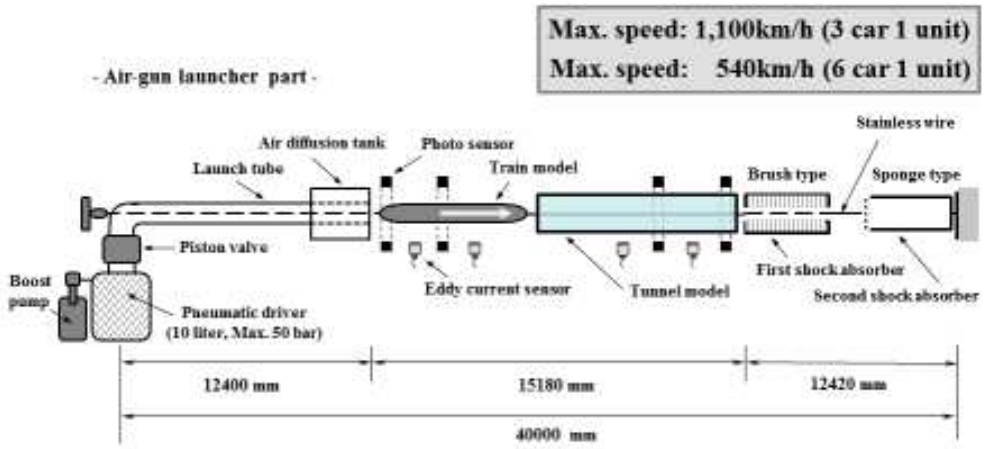
(가) 1/64축척 초고속 열차모델 터널 주행시험장치의 성능

○ 축척모델 공기역학 주행시험이란?

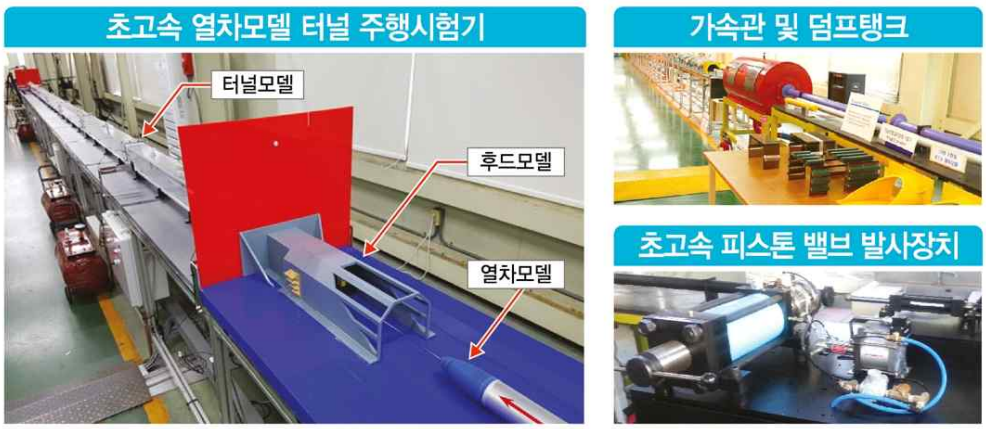
- 현장시험으로 고속열차의 주행조건과 토목시설물 설계변경 조건을 구현하기 어렵고, 비용과 시간이 많이 드는 공기역학 현상을 연구하기 위하여 관심영역에 대하여 마하수 상사법칙을 적용하여 축척모델에 대하여 고속열차의 실제 속도로 주행 실험하는 방법임.
- 터널 내부에 전파되는 압력파(압력변동량)와 터널 출구 미기압파에 대한 연구에 주로 적용됨. 열차풍에 대해서는 상사법칙이 적용되지 않으므로 상대비교의 경향만 파악 가능함.

○ 철도연의 열차모델 터널 주행시험기(moving model test rig)

- 열차모델 발사장치: 초고속 피스톤 밸브 적용(에어건 방식)
- 드라이버 체적: 10 liter
- 드라이버 압력: 50 bar(최대 사용압력)
- 열차모델 최고속도: 540km/h (열차모델 10량1편성)
- 열차모델 최고속도: 1,100km/h (열차모델 5량1편성)
- 1/92축척과 1/64축척 시험 가능



<그림 2.1.1a 열차모델 터널 주행시험기 개략도(표준형)>

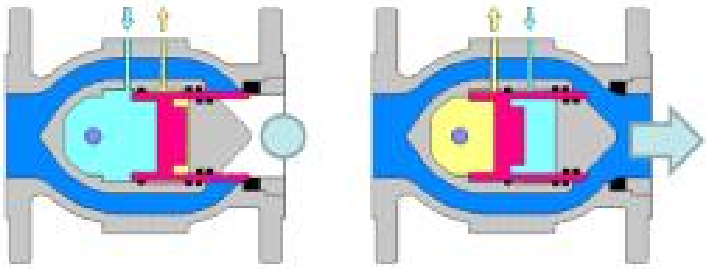


<그림 2.1.2a 초고속 열차모델 터널 주행시험기(최고속도 540km/h): 한국철도기술연구원 소재>



<그림 2.1.3a 초고속 열차모델 터널 주행시험기의 각 파트 구성>

- 본 열차모델 터널 주행시험기는 열차모델을 다량편성에서 안정적으로 시험할 수 있도록 성능개선 되었음(2014년).
- 이전에는 발사장치의 드라이버의 체적이 작아 소량편성으로 발사하여 시험하였으나 드라이버의 용량 증가로 300km/h이상에서 다량편성 주행시험이 가능하게 되었음(그림 2.1.3a 참조).
- 또한 기존의 파열막 밸브방식은 다량편성 발사 시에 파열막의 팽창과 기밀의 한계로 20bar 이상의 발사압력 운영이 불가능하였음.
- 강력한 드라이버의 장착과 피스톤 밸브의 초고속 열림으로, 유선형 후미부를 적용하여도 같은 발사압력에서 열차모델의 속도 재현성이 일정하게 되었음(그림 2.1.3a, 그림 2.1.4a 참조).



<그림 2.1.4a 열차 모델 발사장치의 초고속 피스톤밸브의 작동 원리(밸브 열림: 0.2 sec이하)>



<그림 2.1.5a 터널 주행시험기의 제어장치와 열차모델 충격흡수 제동장치>

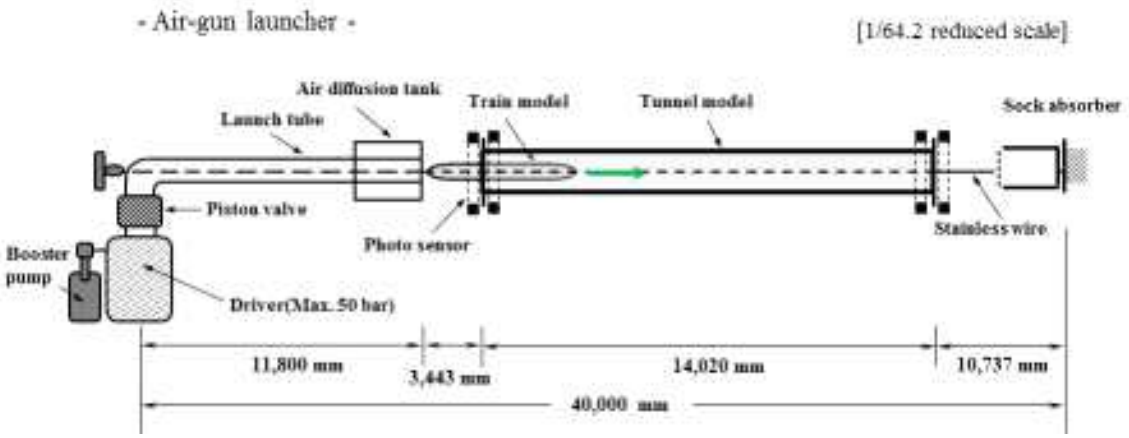
- 시험기의 제어장치에서 열차모델의 진행방향을 추종하게 하는 와이어(guidance wire)의 당김을 제어하는데, 스테인레스 와이어의 항복점 바로 전까지 당겨서 열차모델이 주행 중 처짐과 진동량을 최소화시켰음. 열차모델을 발사 후에 열차모델의 재사용을 위하여 충격흡수장치를 사용하는데, 이 충격흡수 제동장치는 열차무게의 증가에 대하여 안정적으로 충격 흡수력을 나타내고 있음(그림 2.1.5a 참조).

(나) 1/64축척 초고속 열차모델 터널 주행시험장치의 구성

○ 열차모델 터널 주행시험기의 구성

- 초고속 열차모델 터널 주행시험기(그림 2.1.6a)는 열차모델의 주행에 따라 크게 발사부, 실험부, 제동부로 구분되어짐. 발사부는 에어건(air-gun)방식으로, 공기압 실린더에 공기를 고압으로 압축하여 실린더의 개구부에 있는 피스톤밸브를 초고속으로 개방하여 고압의 공기가 개구부 앞, 발사튜브(launching tube) 시작단에 정지되어있는 열차모델을 고압으로 발사(추진)하게 된다. 고압으로 추진되는 열차모델은 발사튜브에서 가속하여 공기소산탱크(air diffusion tank)에서 목표속도에 도달하여 주행하게 됨.

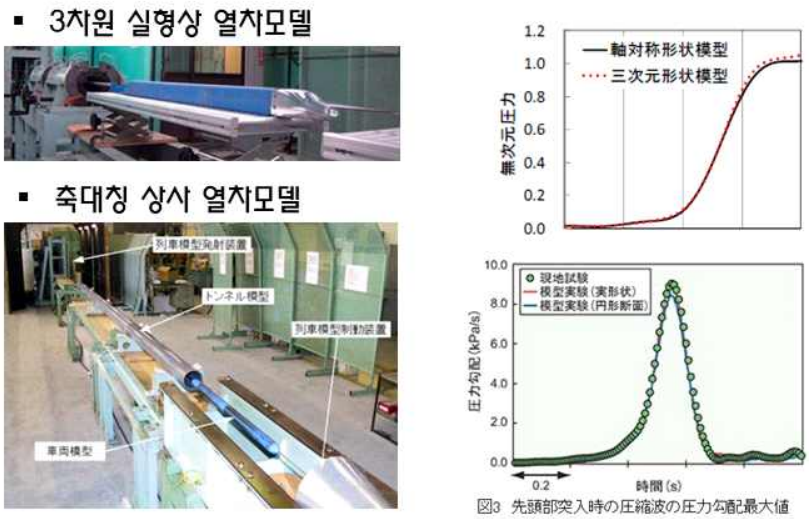
- 본 연구에서는 오송종합시험선과 동해선, 경전선 등의 터널 주행실험을 위하여 축척비 1/64.2로 EMU-250 열차모델과 터널모델들을 제작하였음.
- 마하 수 상사법칙을 적용하여, 열차모델의 터널입구에서의 주행속도는 175km/h ~ 300km/h로 실제 속도를 적용하였으며, 열차모델의 터널 돌입에 따라 터널모델 내부에 발생되는 압력파와 터널 입/출구 외부로 방사되는 미기압파(소닉-붐)를 다양한 위치에서 계측하고 분석하였음(그림 2.1.6a 참조).



<그림 2.1.6a 본 기술개발에서의 "열차모델 터널 주행시험장치" 전체 구성도(개조형)>

○ **열차모델 사양**

- 본 연구의 열차모델 터널 주행시험을 수행하기 위하여, 열차모델은 EMU-250과 KTX-산천(KTX-Ⅱ) 고속열차를 전두부 첨단부터의 유효단면적 변화를 축대칭 상사로 변환하여 제작하였음.

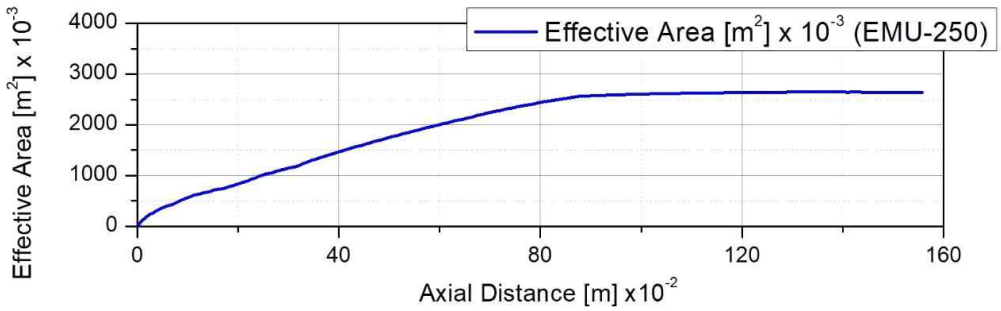


<그림 2.1.7a 일본철도총합연구소의 3차원 실형상 열차모델과 축대칭 상사 열차모델의 터널 주행시험 특성비교 결과[RTRI, 2011]>

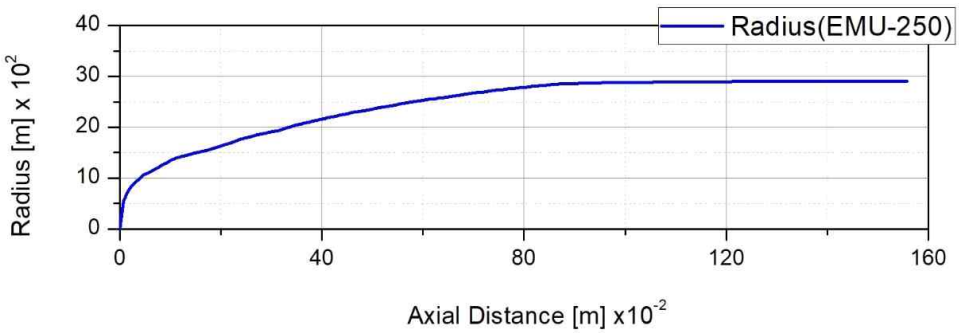
- 2011년의 일본철도총합연구소(RTRI)의 연구결과에 의하면 3차원 실형상 열차모델과 축대칭 상사 열차모델의 터널내 압력변동 비교시험에서 터널내 압력변동량과 압력구배에서 2% 이내의 오차를 보임(그림 2.1.7a 참조). 즉 터널 미기압파 저감 후드 개발시험에 문제없음[RTRI, 2011].
- EMU-250 고속열차는 200km/h, 250km/h급의 신규노선에 투입될 열차로 2017년도에 개발 완료되었으며 시운전 검증시험이 남아있음(그림 2.1.8a 참조).



<그림 2.1.8a EMU 250 고속열차 사진>



<그림 2.1.9a EMU-250 고속열차 전두부의 유효단면적변화에 대한 축대칭상사 제원(1/64.2 축척)>

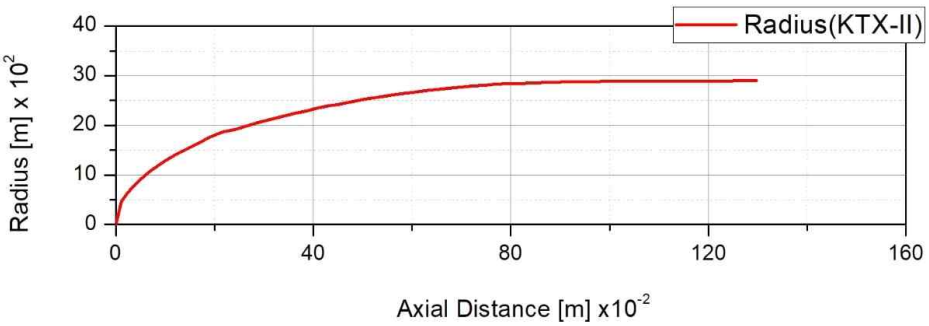


<그림 2.1.10a EMU-250 고속열차 전두부의 축대칭상사 반지름변화 제원(1/64.2 축척)>

- 그림 2.1.9a과 그림 2.1.10a에 각각 EMU-250 고속열차 전두부의 유효단면적변화에 대한 축대칭상사 제원(1/64.2 축척)과 전두부의 축대칭상사 반지름변화 제원(1/64.2 축척)을 나타내었음.



<그림 2.1.11a KTX-산천(KTX-Ⅱ) 고속열차 사진>

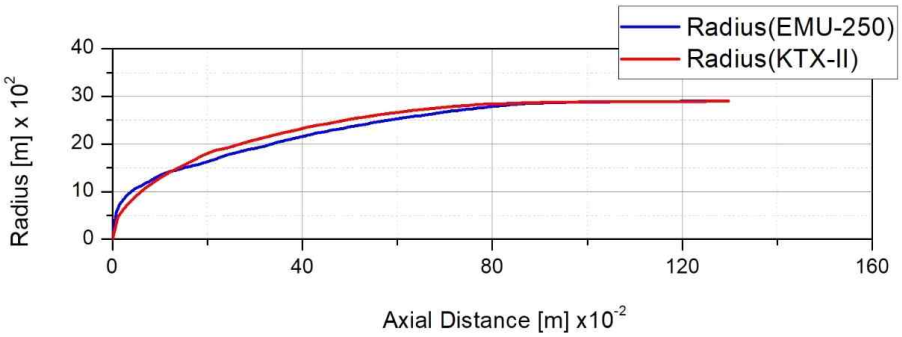


<그림 2.1.12a KTX-산천 고속열차 전두부의 축대칭상사 반지름변화 제원(1/61.5 축척)>

- KTX-산천 고속열차의 사진은 그림 2.1.11a에 나타내었고, 그림 2.1.12a에 KTX-산천 고속열차 전두부의 축대칭상사 반지름변화 제원(1/61.5 축척)을 나타내었음.
- 표 2.1.1a에는 각국의 고속열차 주요사양을 나타내었으며 KTX-산천 고속열차의 투영단면적은 10m^{2}이고 EMU-250 고속열차는 10.89m^{2}임. EMU-250 고속열차가 동력분산식(EMU)차량이라 단면적이 0.89m^{2}만큼 더 큼. EMU-250 고속열차가 KTX-산천 고속열차보다 터널 미기압파 발생에서 약간 더 불리함.

<표 2.1.1a 각국의 고속열차 주요사양>

열차 종류	영업 최고속도	이층열차 여부	선두차량 투영 단면적(㎡)	추진 방식
KTX	300km/h	Single Level	9.87	동력 집중식
KTX-산천	300km/h	Single Level	10	동력 집중식
EMU-250	250km/h	Single Level	10.89	동력 분산식
신칸센 300계	270km/h	Single Level	11.40	동력 분산식
신칸센 500계	300km/h	Single Level	10.20	동력 분산식
신칸센 N700계	260km/h	Single Level	10.97	동력 분산식
독일ICE3	330km/h	Single Level	10.40	동력 분산식
프랑스AGV	360km/h	Single Level	10.50	동력 분산식



<그림 2.1.13a KTX-산천(1/61.5 축척)과 EMU-250 고속열차(1/64.2 축척) 모델의 전두부 축대칭상사 반지름변화 비교>

- 그림 2.1.13a에는 KTX-산천과 EMU-250 고속열차의 투영단면적을 같은 크기로 비교하였을 때의 전두부 축대칭상사 반지름변화를 비교하였음. EMU-250이 KTX-산천보다는 전두부 선두에서 약간 더 뭉뚝한 반면에 전두부 반지름 변화에서는 더 유선형임을 보여주고 있음.

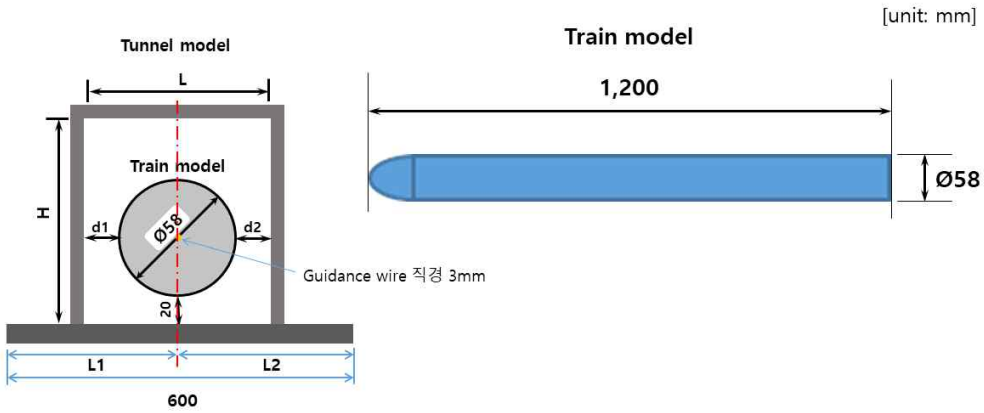


<그림 2.1.14a EMU-250 고속열차 축대칭 상사 열차모델 (1/64.2 축척)>

- 최종적으로 제작된 KTX-산천과 EMU-250 고속열차의 축대칭상사 열차모델은 그림 2.1.14a와 그림 2.1.15a에 나타내었음.



<그림 2.1.15a KTX-산천 고속열차 축대칭 상사 열차모델 (1/61.5 축척)>



<그림 2.1.16a 축척모델 주행시험에서의 터널모델과 열차모델 제원>

- 오송시험선 터널들에 대한 열차모델의 주행시험 배치도는 그림 2.1.16a에 나타내었음. 축대칭 상사 열차모델의 직경은 58mm이고 열차모델 길이는 1,200mm로 3량1편성에 해당됨(열차모델의 평균무게는 652.3g), EMU-250 고속열차을 기준으로 1/64.2축척으로 열차모델과 터널모델을 제작하였음.
- 본 기술개발 실험은 공기역학의 상사법칙에서 “속도에 맞추는 상사법칙”을 적용하였음. 이는 마하 수 상사법칙이라고도 함.

(2) 열차모델 터널 주행시험의 계측시스템 구성

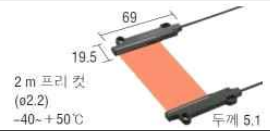
(가) 열차모델 터널 주행시험의 계측장치

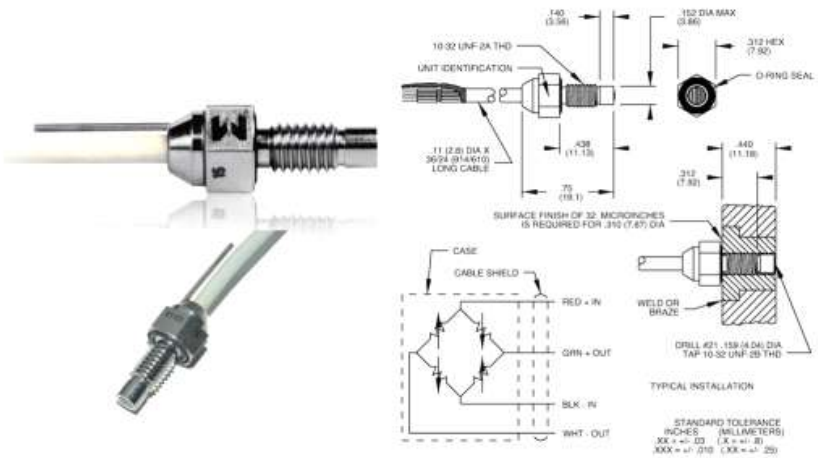
○ 터널 주행시험의 계측장치

- 열차모델 터널 주행시험 장치(Moving model test rig)에서 열차모델의 속도를 정확하게 계측하기 위하여 키엔스(Keyence)사의 포토센서(photo sensor)를 적용하였음.
- 키엔스 포토센서는 앰프(Keyence 모델: FS-V31)와 적색 LED의 화이버 유닛(fiber unit, Keyence 모델: FU-E11와 FU-E40 사용)으로 구성되어 있는데 앰프는 고속모드(high speed mode)와 파인모드(fine mode) 등으로 구성되어 있으며 본 연구에서는 250km/h급 열차속도를 감안하여 고속모드(응답속도: 33μs)를 적용하였음.
- 화이버 유닛 FU-E11은 폭이 11mm인 에어리어 빔(area beam)을 내보내며, 본 연구에서는 열차모델 가속튜브 앞에 설치하여 계측 트리거(trigger)로 사용하였음(표 2.1.2a 참조)
- 화이버 유닛 FU-E40은 폭이 40mm인 에어리어 빔(area beam)을 내보내며, 본 연구에서는 터널입구 영역과 터널출구 영역에 각각 3개씩 설치하여, 열차모델의 통과 감지와 열차모델 속도를 조화평균으로 계산하는데 사용하였음(표 2.1.2a 참조).
- 고속철도 터널에서의 공기역학 현상은 매우 복잡한 비정상 난류유동이기 때문에, 시간에 따른 압력변동을 정확하게 계측하기 위해서는 동적인 압력계측에서 감도가 매우 우수한 센서를 사용해야 함.

- 본 연구에서는 압전저항형 압력센서(Piezoresistive pressure transducer)로 그림 2.1.17a의 MEGGITT Sensing System 사의 ENDEVCO 모델 8510B-1의 게이지 압력센서을 사용하였음.
- 이 압력센서는 최대 0.0362mV/Pa의 민감도를 가지고 있으며, 측정범위는 6,895Pa(1 PSI)이고, 초저주파 대역을 포함하여 비교적 넓은 주파수 대역에 대하여 측정이 가능하도록 주파수특성이 평탄한 것으로 알려져 있음. 본 연구의 터널 내부의 압력변동을 계측하는데 만족스러운 정밀도를 갖추고 있음. 분해능은 0.5Pa임.
- 터널모델 입/출구 외부에서의 미기압파(소닉-붐)을 계측하기 위하여 일본 RION 사의 저주파 음압계인 모델 NL62를 사용하였으며, 주파수 범위는 1Hz에서 20kHz까지 계측 가능함(그림 2.1.18a 참조).
- 소닉-붐(또는 폭발음) 계측은 실시간 피크 값이 중요하므로 실시간으로 C-Weighting 음압을 NL62 음압계의 AC OUT 단자로 전압 시그널 값으로 출력되게 하여, RION 사에서 제공된 캘리브레이션 차트로 데시벨과 Pascal 값으로 환산하였음.

<표 2.1.2a 포토센서의 LED 화이버 유닛 사양 및 적용 방법>

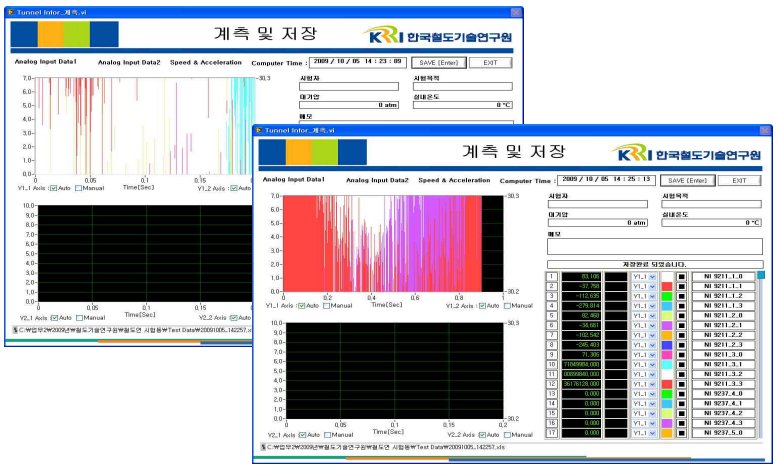
와이드 에어리어 화이버 유닛	구 성	적용 방법
Keyence FU-E11		열차모델 가속튜브 앞에 설치하여 계측 트리거로 사용
Keyence FU-E40		터널입구 영역과 터널출구 영역에 각각 3개씩 설치하여, 열차모델의 통과와 속도 계측



<그림 2.1.17a Endevco 8510B-1 압력센서(Gage, 1PSI range)>



<그림 2.1.18a 미기압파 계측을 위한 Rion NL62 음압계(주파수 범위: 1Hz~20kHz)>



<그림 2.1.19a 계측시스템 제어를 위한 랩뷰(LabView) 프로그램>



<그림 2.1.20a 압력변동 계측을 위한 대기압 기준탱크>

<표 2.1.3a 계측장비의 주요제원>

구 분	모델명	사 양
계측 컴퓨터	General PC	CPU : 2.0GHz Memory : 1.0GB
DAQ (계측 데이터 취득 장치)	NI-cDAQ-9172	<8-slot USB chassis> Amount : 1 EA Channel : 32 In/out frequency : 0 to 20MHz Timing resolution : 50ns Max. sampling rate : 3.2MS/s (aggregate)
	NI9237 Module	Amount : 3 EA Channel : 4 Range : ±25 mV/V Resolution : 24bit Max. sampling rate : 50kS/s/ch
	NI9215 Module	Amount : 3 EA Channel : 4 Range : ±10V Resolution : 16bit Max. sampling rate : 100kS/s/ch
포토센서 (Digital fiber sensor)	Keyence FS-V31 (Amplifier)	Amount : 7 EA Model : NPN ouput Light source : Red 4-element LED Peak wave length : 640nm (LED) Response time : High speed mode (33μs) Control output : 1-5V, 24V
	Keyence FU-11 (Fiber unit)	Amount : 1 EA Purpose of use : Measuring trigger Source of light : Area 11mm (LED) detecting distance : 1,300mm (High speed mode)
	Keyence FU-40 (Fiber unit)	Amount : 6 EA Purpose of use : Passage detecting of train model Source of light : Area 40mm (LED) detecting distance : 2,500mm (High speed mode)
압력센서 (게이지압력)	Endevco 8510B-1 Pressure Transducer	Amount : 6 EA Purpose of use : Meas. of pressure transients Range : 1 PSI (6.9 kPa) Max. sensitivity : 250mV/psi
저주파 음압계	RION NL-62 Sound Level Meter	Amount : 5 EA Purpose of use : Meas. of micro pressure waves Type : Microphone(Model: UC-59L) Frequency range : 1Hz to 20KHz Frequency weighting : A, C and Z
대기압, 온도, 습도계	Lutron MHB-382SD	Amount : 1 EA Purpose of use : Meas. of Humidity/Barometer/Temp. Humidity resolution : 0.1% R.H. Temp. resolution : 0.1degree Barometer resolution : 0.1(±1.5mmHg)

- 각각의 포토센서와 압력센서, 음압계는 데이터취득장치(DAQ)에 시그널 케이블로 연결하였고, 모든 센서들의 계측은 그림 2.1.19a의 랩뷰(LabView) 프로그램에서 제어됨.
- 데이터취득장치(NI사의 cDAQ-9172)는 데이터취득 어뎁터(DAQ adaptor)로서 여러 종류의 데이터 취득장치 모듈을 장착하여 사용할 수 있음. 첫 번째 포토센서(Keyence FU-E11)는 모든 센서들이 데이터를 받을 수 있게끔 시작 트리거(trigger) 역할을 하며, 열차모델이 첫 번째 포토센서의 LED 광신호 발신부와 수신부 사이에 도달하면 터널모델에 설치된 모든 센서들이 1초에 0.0004초 간격으로 25,000개(25kHz)의 물리적 시그널을 받도록 프로그램화하였음.
- 25,000Hz의 데이터 취득율(sampling frequency)은 본 연구의 공기역학적 압력변동의 피크 값을 얻는데 충분함. 공기역학적 압력변동은 Endevco 8510B-1 압력센서의 대기압 튜브와 연질의 타이곤 튜브로 연결된 대기압 기준탱크를 기준압으로 차압 방식으로 계측하였음(그림 2.1.20a 참조). 이 대기압 기준탱크는 케이스별 계측실험 바로 직전에 대기압을 채운 후에 밸브를 닫아, 온도에 의한 탱크내의 대기압 변동을 최소로 하였음. 전체 계측시간은 3초 이내임.



<그림 2.1.21a 데이터 취득 장치(NI-cDAQ-9172)>



<그림 2.1.22a 열차모델 감지 포토센서(센서: FU-E40, 앰프: FU-V31)>

- 센서들에 의한 계측 시그널들은 그림 2.1.21a에서와 같이 데이터 취득장치인 A/D 컨버터(analog-digital converter)를 통해 디지털화 되고 PC에 저장됨. 실험에 사용된 계측장치들의 제원은 표 2.1.3a에 정리하였음. 실험실 내부의 대기압, 온도, 습도는 별도의 포터블 장치(Lutron사의 MHB-382SD)로 계측 케이스별로 측정하여 기록하였음. 이 대기압/온도/습도 계측장치는 SD 메모리카드를 사용하는 실시간 데이터 로거임
- 주행하는 열차모델의 속도 측정방법은 두 위치의 포토센서 사이를 열차모델이 통과하며 계측하는 시간과 미리 입력된 포토센서 사이의 축방향 거리로 속도를 계산하였음. 키엔스(Keyence) 사의 포토센서는 광 발신부와 수신부가 1세트로 열차모델을 감지하고, 총 7세트의 포토센서가 각각 계측 시작 트리거, 터널입구 진입속도, 터널내부 주행 평균속도, 터널출구 퇴출속도를 측정/계산할 수 있도록 하였음(그림 2.1.22a 참조)

<표 2.1.4a 터널모델 및 열차모델 세부제원>

구분	오송시험선 단선터널	동해선 경전선 단선터널	남부내륙철도
열차모델	EMU-250	EMU-250	EMU-250
축척	1/64.2	1/64.2	1/64.2
터널단면적	제 5터널 50.3㎡	39.97㎡	56.69㎡
축척 터널단면적	99.6mm x 122.5mm = 12,201㎟	88.33mm x 109.78mm = 9,697㎟	116mm x 118.57mm = 13,754㎟
실척 열차단면적	10.89㎡	10.89㎡	10.89㎡
축척 열차단면적	2,642㎟	2,642㎟	2,642㎟
Blockage ratio	0.217	0.272	0.192
실척 터널길이	K1 : 900m	K3 : 900m	K5 : 900m
축척 터널길이	K1 : 14,020mm	K3 : 14,020mm	K5 : 14,020mm
실척 열차길이	77.04m	77.04m	77.04m
축척 열차길이	1,200mm	1,200mm	1,200mm

(3) 주행시험을 위한 터널 축소모델 제작 및 계측상세

(가) 터널 축소모델 제작과 계측센서 설치 상세제원

○ 터널시스템 제작 및 계측센서 설치 상세제원

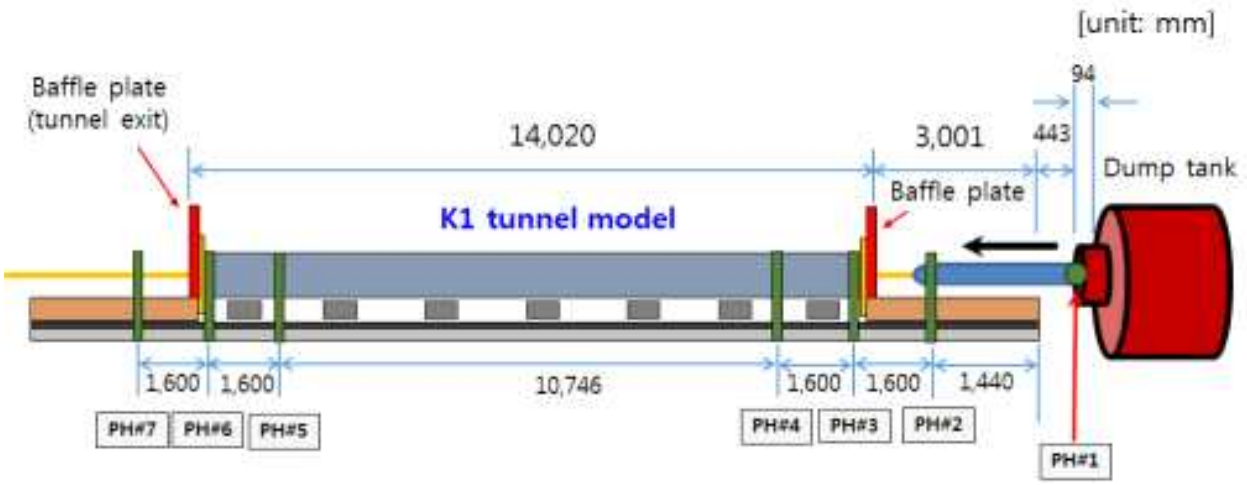
- 국내에서 적용 가능한 단선터널 내공단면적별로 최적화된 후드를 공기역학적으로 최적 설계하고자, 주행시험을 위한 터널시스템을 다음과 같이 설계 제작하였음,
- 터널 연장은 900m로 공통이며, 터널 내공단면적은 표 2.1.4a와 같이 50.3m^2, 39.97m^2, 56.69m^{2}이며, 열차모델은 EMU-250으로 선정하였음(표 2.1.4a 참조)
- 1/64.2축척으로 터널모델과 열차모델을 제작하였으며, 열차모델은 3량1편성으로 제작하여, 열차가 터널 진입 시의 압축파가 충분히 형성되도록 하였음.
- 표 2.1.5a에 터널모델별 연장과 축척비를 나타내었고, 표 2.1.6a에 터널별 등가직경 길이를 나타내었음.

<표 2.1.5a 터널별 연장>

터널명	터널구분	풀 스케일 터널길이(m)	1/64.2 축척 터널길이(mm)
오송 제 5터널	K1	900	14,020
동해선, 경전선 등	K3	900	14,020
남부내륙철도	K5	900	14,020

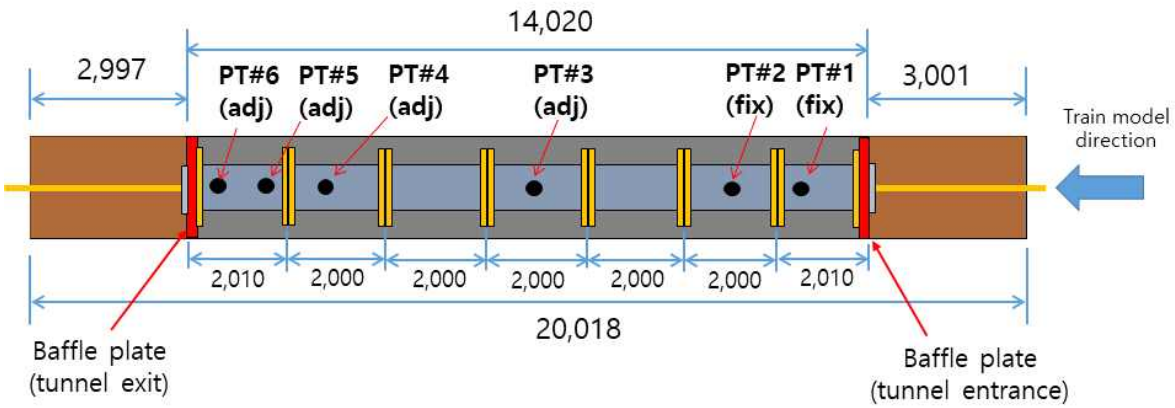
<표 2.1.6a 터널별 등가직경>

터널구분	풀 스케일 단면적(m^2)	풀 스케일 등가직경 D(m)	풀 스케일 3xD(m)
K1	50.30	8.00	24.01
K3	39.97	7.13	21.40
K5	56,69	8.50	25.49

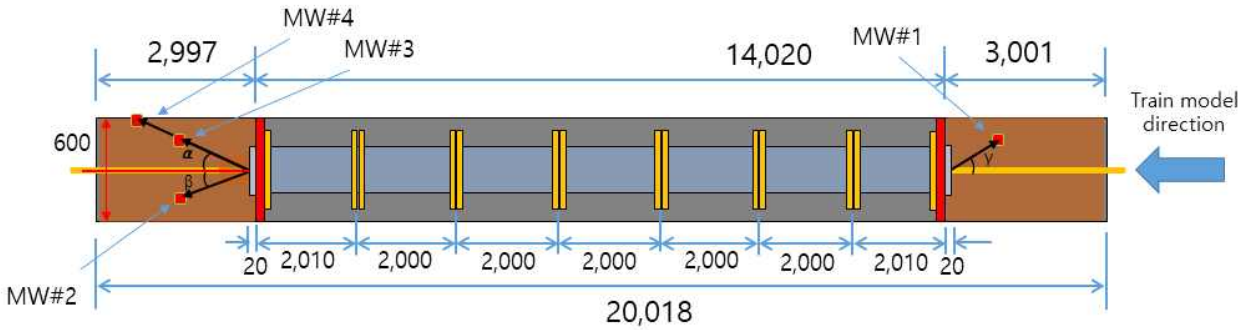


<그림 2.1.23a 열차모델 감지 포토센서 배치도(PH#1~PH#7) : 측면도>

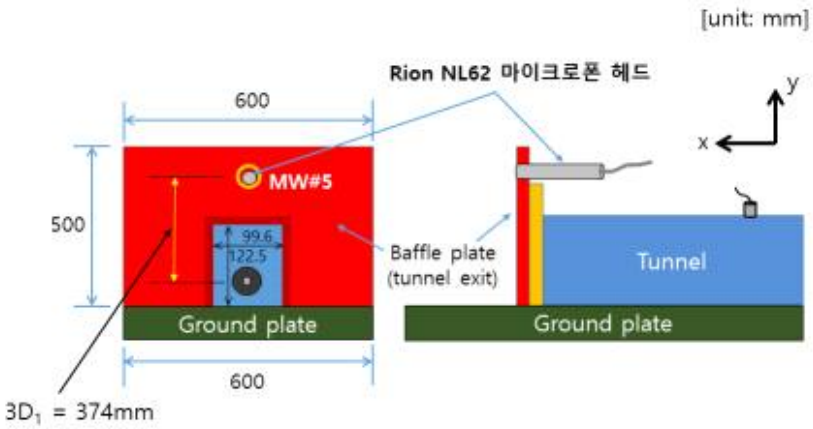
- 표 2.1.4a과 표 2.1.5a와 같이 K1, K3, K5의 3가지 터널모델을 1/64.2축척으로 제작하였음. 1차년도에는 K1터널, 2차년도에는 K3 터널모델, 3차년도에는 K5 터널모델을 적용하여 고성능 최적 후드 개발을 위한 터널 주행시험을 실시하였음.
- 터널 미기압파 방사의 무지향성을 주행시험으로 고찰하기 위하여 표 2.1.6a과 같이 터널별로 등가직경을 정리하였음.
- 그림 2.1.23a은 터널모델의 측면도이며 터널길이는 14,020mm로 풀 스케일로는 900m에 해당함.
- 또한 그림 2.1.23a는 에어리어 포토센서의 설치위치를 나타내었으며 PH#1은 열차모델을 감지하여 A/D 컨버터에서 계측을 시작하는 트리거(trigger)로 사용하였으며, 터널입구 영역에 PH#2~PH#4의 3개의 에어리어 포토센서를 설치하여 1440mm와 1600mm간격으로 열차모델을 3번 감지하고, 구간 속도를 조화 평균하여 터널 입구에서의 속도를 계측하였음. 터널출구도 H#5~PH#7의 3개의 에어리어 포토센서를 설치하여 1600mm간격으로 열차모델을 3번 감지하고 조화 평균하여 터널 출구에서의 속도를 계측하였음.
- 그림 2.1.24a은 열차주행 시 터널내 압력변동을 관찰하기 위한 압력센서(Endevco 8510B-1)의 위치를 터널 모델별로 표 2.1.7a에 정리하여 나타내었음.
- 그림 2.1.25a는 터널입구 외부와 터널 출구 외부에서의 RION NL-62 저주파 음압계에 의한 미기압파 계측 위치를 표 2.1.7a에 정리하여 나타내었음.



<그림 2.1.24a 8510B-1 압력센서 배치도(PT#1~PT#6): 평면도>



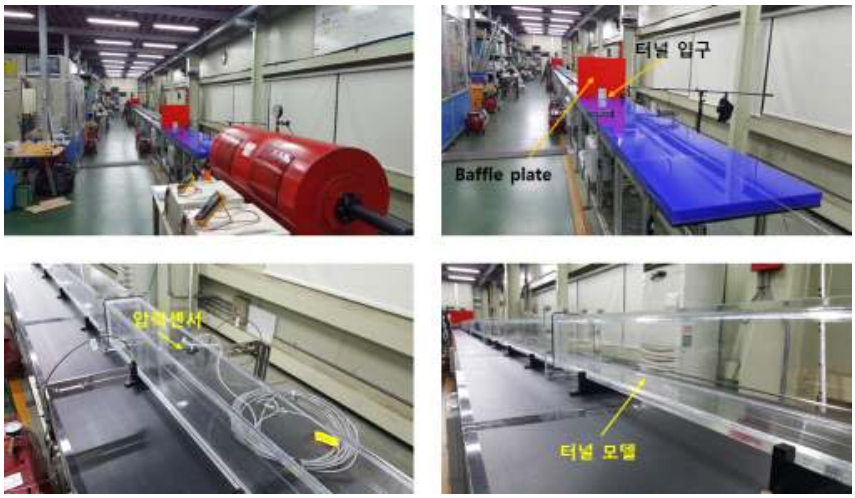
<그림 2.1.25a Rion NL62 음압계의 마이크로폰 배치도(MW#1~MW#5): 평면도>



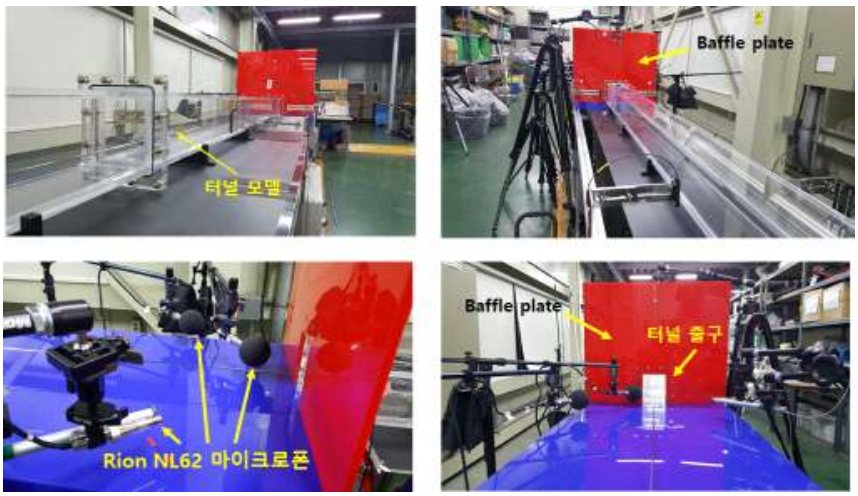
<그림 2.1.26a Rion NL62 음압계의 마이크로폰 배치도(MW#5): 배플 플레이트 면에 설치>

<표 2.1.7a 단선터널 모델별 압력센서 및 마이크로폰 설치위치 제원>

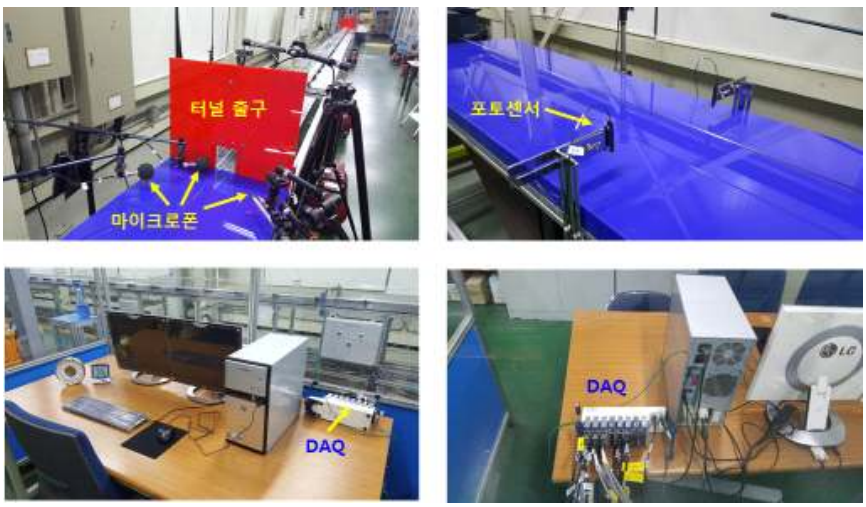
구분		K1터널 (오송시험선 제5터널)	K3터널 (동해선, 경전선 등 터널)	K5터널 (남부내륙철도 터널)
Pressure transducer	PT#01	터널입구로부터 터널내부로 1,558㎜	터널입구로부터 터널내부로 1,558㎜	터널입구로부터 터널내부로 1,558㎜
	PT#02	터널입구로부터 터널내부로 3,115㎜	터널입구로부터 터널내부로 3,115㎜	터널입구로부터 터널내부로 3,115㎜
	PT#03	터널입구로부터 터널내부로 4,673㎜	터널입구로부터 터널내부로 10,905㎜	터널입구로부터 터널내부로 7,010㎜
	PT#04	터널입구로부터 터널내부로 10,903㎜	터널입구로부터 터널내부로 12,462㎜	터널입구로부터 터널내부로 10,905㎜
	PT#05	터널입구로부터 터널내부로 13,645㎜	터널입구로부터 터널내부로 13,688㎜	터널입구로부터 터널내부로 12,462㎜
	PT#06	터널입구로부터 터널내부로 13,894㎜	터널입구로부터 터널내부로 13,909㎜	터널입구로부터 터널내부로 13,922㎜
Microphone (Sound level meter)	MW#01	터널입구에서 외부로 312㎜, 각도(γ) 45°	-	-
	MW#02	터널출구에서 외부로 312㎜, 각도(β) 45°	터널출구에서 외부로 312㎜, 각도(β) 30°	터널출구에서 외부로 312㎜, 각도(β) 30°
	MW#03	터널출구에서 외부로 312㎜, 각도(α) 45°	터널출구에서 외부로 312㎜, 각도(α) 30°	-
	MW#04	터널출구에서 외부로 624㎜, 각도(α) 45°	터널출구에서 외부로 624㎜, 각도(α) 30°	-
	MW#04	터널출구에서 수직방향으로 374㎜	-	-



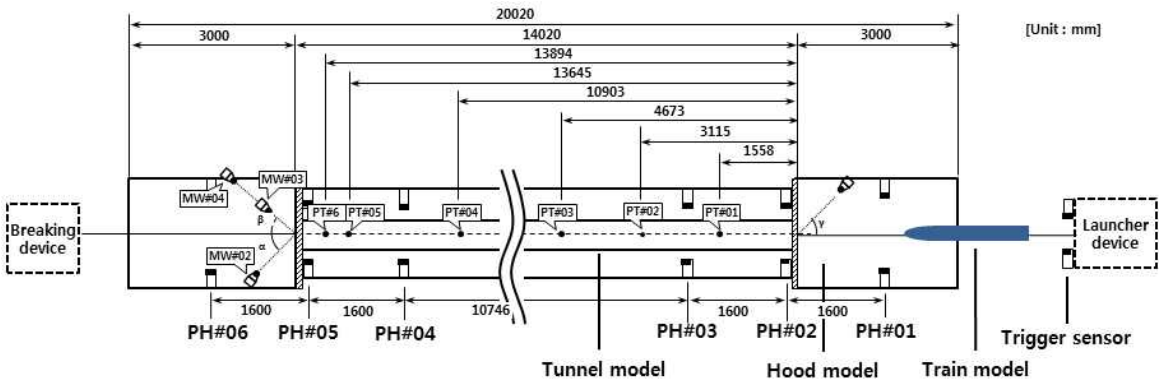
<그림 2.1.27a K1 터널모델 및 계측센서 설치사진 1>



<그림 2.1.28a K1 터널모델 및 계측센서 설치사진 2>



<그림 2.1.29a K1 터널모델, 계측센서, DAQ 설치사진>



<그림 2.1.30a 열차모델 터널 주행시험장치의 계측센서 설치 개요도(K1 터널모델)>

- 그림 2.1.26a의 MW#5는 터널출구면의 배플 플레이트(baffle plate)에 설치된 음압계 마이크로폰이며 터널모델 등가직경 3D 위치임. 본 연구에서는 미기압파 발생의 원천을 열차모델의 중심으로 간주하였음.
- 상기와 같이 제작된 열차모델 터널 주행시험기(moving model test rig)의 터널모델과 계측시스템 사진은, 대표적으로 K1터널모델에 대하여 그림 2.1.27a~그림 2.1.29a에 나타내었음.
- K1 터널 주행시험의 계측센서에 대한 설치 종합 개요도를 그림 2.1.30a에 나타내었음. K3 터널모델과 K5 터널모델에 대한 계측센서 설치 위치는 표 2.1.7a에 정리하였음.

(4) 계측센서와 열차모델 발사장치의 캘리브레이션

(가) 열차모델 터널 주행시험의 계측센서 캘리브레이션

○ 터널 미기압파 계측센서의 캘리브레이션

- 터널 입/출구 외부 5개소 위치에서 미기압파를 계측하기 위하여 Rion NL-62 저주파 음압계를 사용함. Rion NL-62 저주파 음압계에 대해서 국가 공인 검/교정기관에서 매년 검사와 교정을 받고 있음(정성적 성과점검보고서(A-1-1)에 교정성적서 첨부함).
- 보유하고 있는 캘리브레이션 장비는 Rion사의 PISTONPHONE NC-72A 모델임. 1개월에 1번씩 주기적으로 2차 캘리브레이션(교정)을 피스톤 폰으로 자체적으로 수행하고 있음. 250Hz에서 114dB를 발생시킴.



<그림 2.1.31a 마이크로폰 교정장비: Rion Pistonphone NC-72A>

○ **터널내 압력변동 계측센서의 캘리브레이션**

- 터널모델 내부 6개소 위치(그림 2.1.30a)에서 압력파에 대한 압력변동을 계측하기 위하여 Endevco 8510B-1 게이지 압력센서(계측범위: 1 PSI)를 사용함. 한국표준연구원을 비롯하여 국내의 국가 공인 검/교정기관에서 압력범위 5 PSI 이하의 미세압력센서에 대한 캘리브레이션 정밀도가 매우 낮아서 미세압력센서에 대한 교정장비를 자체 구입/제작함. 국내 국가공인 교정기관에서는 고압센서에 대한 교정장비만 보유하고 있음.

<표 2.1.8a 미세압력센서 교정장치의 성능>

구 분	미세압력센서 교정 필요사양	자체 제작 교정장치 정밀도	비 고
압력 분해능	20 Pa	0.01 Pa	만족
전압 시그널 분해능	0.7 mV	0.001 mV	만족
기준 압력센서 계측범위	1 PSI	1 PSI	만족



<그림 2.1.32a 미국 Additel 사의 모델 901 미세압력 펌프>



<그림 2.1.33a Omega 사의 디지털 압력게이지>



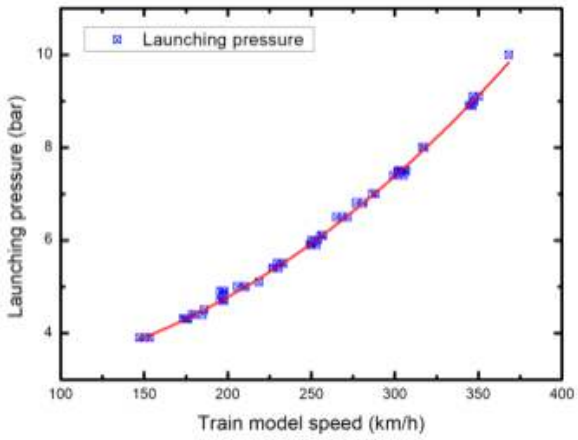
<그림 2.1.34a 미세압력센서 교정장치(자체제작)>

- Endevco 8510B-1 게이지 압력센서는 1 PSI(6,895Pa)의 풀 레인지에서 250mV임. 따라서 적어도 20Pa당 0.7mV의 분해능을 가진 교정장비를 설계하기로 함.
- 먼저 정압을 발생할 수 있는 미세압력 펌프로 미국 Additel 사의 모델 901 테스트 펌프를 선정하였음. ± 6 PSI의 미세압력을 발생할 수 있으며, 분해능은 0.1Pa까지 가능함(그림 2.1.32a 참조).

- 미세압력펌프에서 발생시킨 압력을 읽어 들일 수 있는 표준 게이지압력계로 미국 Omega 사의 디지털 압력게이지로 모델 DPG409-001G를 사용하였음. 이 압력게이지는 출고 시에 미국 NIST에서 검/교정을 받은 게이지 압력센서로 디지털 표시창과 시그널 케이블로 동시에 정압 값을 출력함. 계측범위는 1 PSI이고, 계측 정밀도는 0.08%임(그림 2.1.33a 참조).
- 교정하는 압력센서의 전압 출력 시그널을 읽어 들이기 위하여 초정밀급 디지털 멀티미터로 사용하였는데 일본 HIOKI사의 모델 DT4281이며 0.001mV의 분해능을 가짐. 이 디지털 멀티미터는 PC와 연결하여 읽어 들이는 출력 시그널을 실시간으로 현시할 수 있으며 데이터 저장기능이 있음(그림 2.1.34a 참조).
- 계측센서 교정 시에 대기압 및 온도, 습도 계측은 Lutron사의 모델 MHB-382SD을 사용하였으며 사양은 표 2.1.2a에 나타내었음(그림 2.1.34a 참조).
- 본 연구의 열차모델 터널 주행시험에 사용한 Endevco 8510B-1 압력센서에 대한 교정성적서는 3차년도 정성적 성과점검보고서(A-1-1)에 첨부함.
- 본 연구의 미세 압력센서 캘리브레이션 교정장치 매뉴얼은 2차년도 정성적 성과점검보고서(A-1-1)에 첨부함.

○ 열차모델 발사장치의 터널 진입속도 캘리브레이션

- 열차모델 터널 주행시험기에서 열차모델 발사장치는 에어건(air gun) 방식이며, 에어챔버에 고압의 공기를 주입하여, 챔버 앞단의 피스톤 밸브를 0.2sec 이하의 고속으로 개방하여 열차모델을 주행시킴. 피스톤 밸브의 개방 스피드는 항상 같게 유지함.
- 에어 챔버에 채워 넣는 공기압에 따라 열차모델의 발사속도를 조절할 수 있음. 이 압력을 발사압력이라 부르며 발사압력에 따라 열차모델의 터널 진입속도는 달라지며, 미리 발사압력 대비 열차모델 속도에 대하여 캘리브레이션을 수행하여 원하는 속도로 열차모델을 주행시킬 수 있음. 오차는 ±1.5km/h 이내임
- 그림 2.1.35a는 에어건 장치에서 발사압력 대비 열차모델 속도 캘리브레이션 차트를 나타내었음. 여기서 열차모델 속도는 터널 진입속도임.



<그림 2.1.35a 발사압력 대비 열차모델 속도 캘리브레이션 차트>

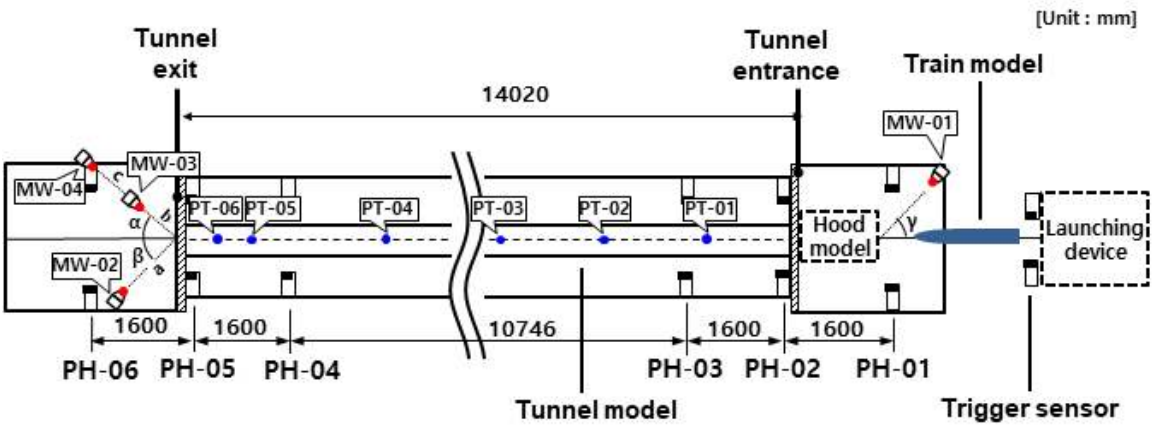
나. 열차속도, 터널단면적, 터널연장별 등 주요 인자를 고려한 최적후드 표준사양 개발

(1) 터널미기압파 저감 후드모델 최적성능 시험

(가) 열차모델 터널주행시험기의 실험부 축소모델 적용

○ 본 연구에서는 1차년도 오송시험선 단선 제5터널, 2차년도 동해선 경전선 단선터널, 3차년도 남부내륙철도 등 3종의 실제 터널 단면적 제원을 1/64.2축척으로 축소하여 열차모델 터널주행시험장치의 실험부에 적용하고 각각의 터널 조건(표 2.1.1b, 표 2.1.2b)에 맞는 최적 후드모델 도출을 목표로 하였음.

○ 열차모델 터널주행시험장치의 실험부는 터널 및 후드 모델의 교체 및 조립을 할 수 있도록 설계되어 있기 때문에 터널 단면적이 다른 3종 모델의 조건에 따른 실험부 모델 교체가 가능함. 그림 2.1.1b는 열차모델 터널주행시험장치의 실험부 개요도로써 압력센서를 제외한 나머지 계측 센서의 위치를 유지한 상태에서 터널모델과 후드모델을 교체가 가능하도록 설계되어있음. 표 2.1.3b는 3종 터널모델들의 시험조건 변경에 따른 터널 내부 압력센서와 출구 마이크로폰 설치 위치 제원이며, 특히 터널 출구 부근에서는 각각의 터널별 등가직경과 등가직경 배수의 위치에서의 압축파 전달 위치에 맞추어 개별적인 제원으로 설치하였음. 후드모델은 다양한 옵션들을 적용할 수 있도록 조립식 모델로 설계하였으며 실험부의 터널 입구에 설치하여 성능시험을 수행하였음.



<그림 2.1.1b 초고속 열차모델 터널주행시험 개요도>

<표 2.1.1b 3종 터널모델의 기본 제원>

터널명(단선)	터널구분	풀 스케일 터널길이(m)	1/64.2 축척 터널길이(mm)
오송 제 5터널	K1	900	14,020
동해선, 경전선 등	K3	900	14,020
남부내륙철도	K5	900	14,020

<표 2.1.2b 3종 터널의 세부 시험 조건>

구분	오송시험선 단선터널	동해선 경전선 단선터널	남부내륙철도
열차모델	EMU-250	EMU-250	EMU-250
축척	1/64.2	1/64.2	1/64.2
터널단면적	제 5터널 50.3㎡	39.97㎡	56.69㎡
축척 터널단면적	99.6mm x 122.5mm = 12,201㎟	88.33mm x 109.78mm = 9,697㎟	116mm x 118.57mm = 13,754㎟
실척 열차단면적	10.89㎡	10.89㎡	10.89㎡
축척 열차단면적	2,642㎟	2,642㎟	2,642㎟
Blockage ratio	0.217	0.272	0.192
실척 터널길이	K1 : 900m	K3 : 900m	K5 : 900m
축척 터널길이	K1 : 14,020mm	K3 : 14,020mm	K5 : 14,020mm
실척 열차길이	77.04m	77.04m	77.04m
축척 열차길이	1,200mm	1,200mm	1,200mm
시험 열차진입속도	180km/h ~ 275km/h	180km/h ~ 250km/h	200km/h ~ 320km/h

<표 2.1.3b 터널별 압력센서 및 마이크로폰 설치위치>

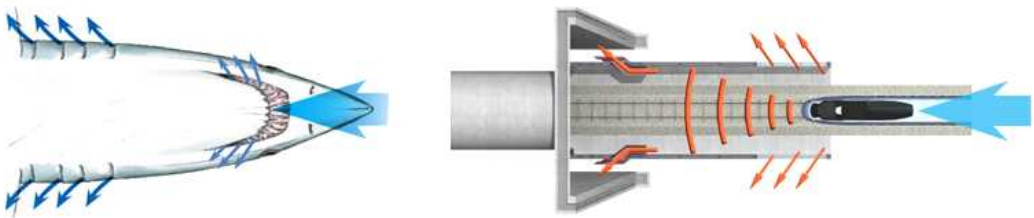
구분		K1터널 (오송시험선 단선터널)	K3터널 (동해선, 경전선 단선터널)	K5터널 (남부내륙철도 단선터널)
Pressure transducer	PT#01	터널입구로부터 터널내부로 1,558mm	터널입구로부터 터널내부로 1,558mm	터널입구로부터 터널내부로 1,558mm
	PT#02	터널입구로부터 터널내부로 3,115mm	터널입구로부터 터널내부로 3,115mm	터널입구로부터 터널내부로 3,115mm
	PT#03	터널입구로부터 터널내부로 4,673mm	터널입구로부터 터널내부로 10,905mm	터널입구로부터 터널내부로 7,010mm
	PT#04	터널입구로부터 터널내부로 10,903mm	터널입구로부터 터널내부로 12,462mm	터널입구로부터 터널내부로 10,905mm
	PT#05	터널입구로부터 터널내부로 13,645mm	터널입구로부터 터널내부로 13,688mm	터널입구로부터 터널내부로 12,462mm
	PT#06	터널입구로부터 터널내부로 13,894mm	터널입구로부터 터널내부로 13,909mm	터널입구로부터 터널내부로 13,922mm

Sound level meter	MW#01	터널입구에서 외부로 312㎜, 각도(γ) 45°	-	-
	MW#02	터널출구에서 외부로 312㎜, 각도(β) 45°	터널출구에서 외부로 312㎜, 각도(β) 30°	터널출구에서 외부로 312㎜, 각도(β) 30°
	MW#03	터널출구에서 외부로 312㎜, 각도(α) 45°	터널출구에서 외부로 312㎜, 각도(α) 30°	-
	MW#04	터널출구에서 외부로 624㎜, 각도(α) 45°	터널출구에서 외부로 624㎜, 각도(α) 30°	-
	MW#05	터널출구에서 수직방향으로 374㎜	-	-

(나) 고성능 터널미기압파 저감 후드모델 설계

○ 250km/h급 고속철도 단선터널의 고성능 터널 미기압파 저감 후드를 개발하기 위하여 생체모사를 적용한 수평 통풍관형 후드모델을 고안함(그림 2.1.2b). 상어는 몸 바깥쪽에 5~7쌍의 아가미 줄을 가지고 있으며 물고기는 물을 머금고 아가미를 통해 배출하여 호흡하는 것과 달리, 상어는 빠른 속도로 앞으로 헤엄치면서 입안으로 발생하는 물의 흐름을 통해 아가미 틈새(gill slits)로 배출하며 호흡함(Shark gill, Wikipedia). 상어가 유영하며 입안으로의 먹이 진입 시에 아가미 틈새가 확대되는데 이 틈새는 물의 유입 방향에 가능한 마주보는 각도로 상어 입안의 내부공간이 변형됨. 유선형 입을 통하여 유입되는 물은 양쪽의 확대된 아가미 틈새로 배출하기 때문에 상어 목구멍 입구 면에서 물의 압력구배는 아가미 틈새로의 물 배출로 인하여 저감 됨.

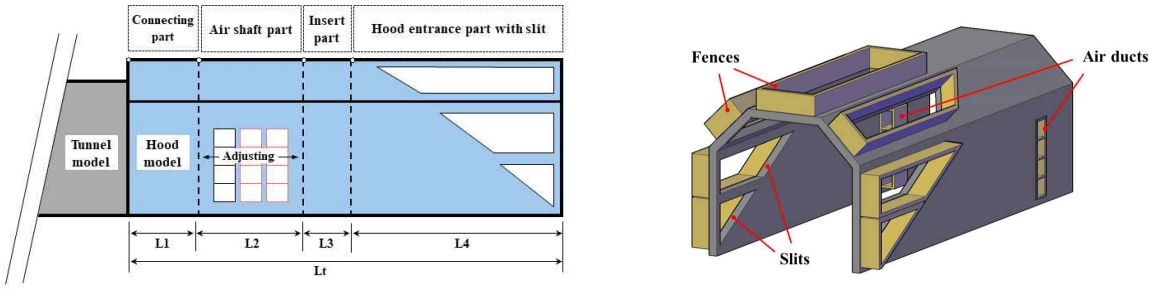
○ 본 시험에서는 열차의 터널진입속도에서 후드모델들의 주요 인자들을 변화시켜 성능평가를 수행하고 각각의 열차모델 속도에서 터널 내 압력구배와 터널 출구 외부의 터널미기압파 저감율을 비교분석하여 최적성능모델을 개발하였음(그림 2.1.3b, 그림 2.1.5b).



<그림 2.1.2b 상어 생체모사형 후드모델 적용 개념>

○ 상어생체모사를 통한 후드모델 설계는 후드의 길이, 수평통풍관 및 슬릿의 옵션을 적용한 다양한 케이스를 효과적으로 시험할 수 있도록 그림 2.1.3b와 같이 후드모델을 세부설계하였음. 설계된 후드모델의 주요 4부분은 터널모델과 연결하기 위한 터널 연결부, 수평통풍관이 설치된 수평통풍관 부, 길이별 연장이 가능한 인서트, 후드입구의 슬릿부

로 구성되어 있음. 후드 입구의 슬릿부는 개구율과 펜스의 높이 변화 등이 가능하도록 설계되었으며 인서트 부에는 L1과 L2의 비율을 조절하여 수평 통풍관의 위치를 변화시킬 수 있음. 상어의 아가미에 해당하는 수평통풍관부(air ducts)는 사각 덕트가 후드 내부 측면에 각각 4개씩 배치되어 있으며 안쪽에서 덕트를 일부 폐쇄함으로써 개방율을 조절할 수 있도록 설계하였음. 터널 연결부는 터널 단면적으로 축소되는 약 8mm 두께의 뒷벽이 존재하여 터널 단면과 연결할 수 있도록 형상을 갖추고 있음.

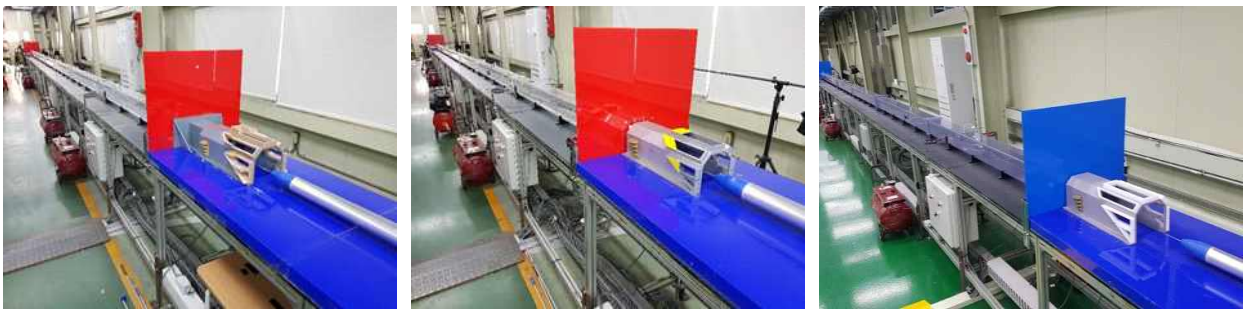


<그림 2.1.3b 실험부 후드모델 개요도>



(a) K1 터널모델 (b) K3 터널모델 (c) K5 터널모델

<그림 2.1.4b 기초환경조건 면벽형 터널모델 설치 전경>



(a) CASE-K1CH107-3모델 (b) CASE-K3A17S_4-10모델 (c) CASE-K5A17S_5-2모델

<그림 2.1.5b 터널별 최적성능 후드모델 설치전경>

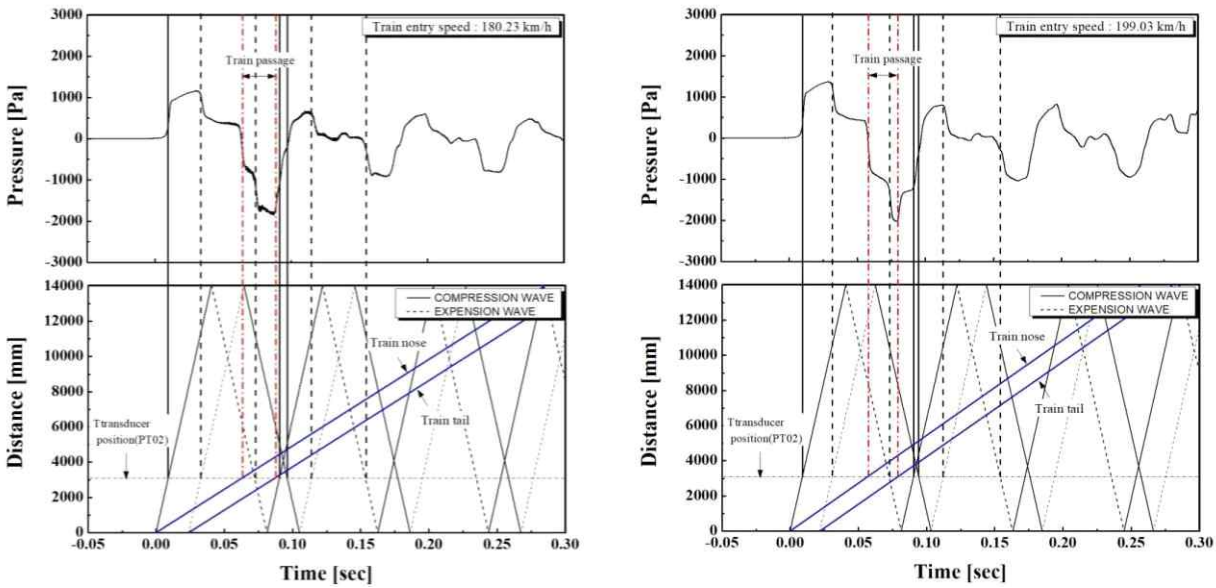
(2) 후드모델 최적성능평가 시험 전략

(가) 실험부 터널모델의 신뢰성 검증

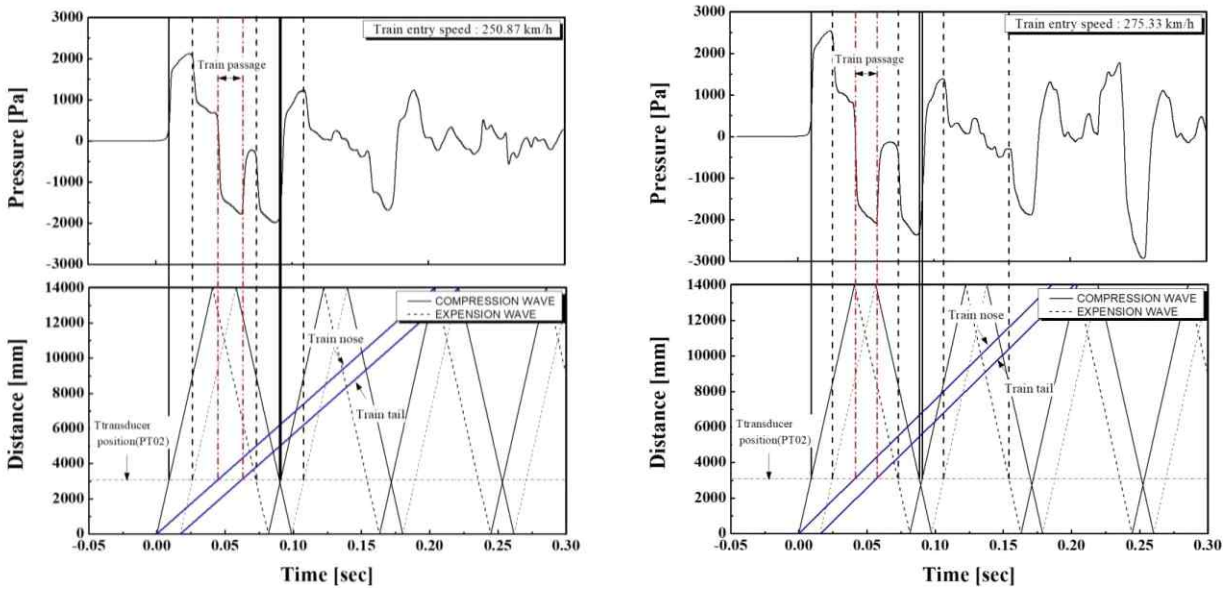
○ 열차모델 터널주행시험기의 실험부 비교시험은 동일한 실험조건이 중요하며, 터널 내부에 발생하는 압축파의 누기는 신뢰성에 가장 큰 영향을 미치게 됨. 본 시험에서는 터널모델의 설치 후 터널모델의 신뢰성 검증을 위한 방법으로 열차의 터널 진입과와 터널 통과로 발생하는 압력파의 거동을 시간과 거리에 대한 상관관계로 분석하여 신뢰성을 검증함.

○ 그림 2.1.6b와 그림 2.1.7b는 K1터널 표준 면벽형 모델에서 열차진입속도별 압력파의 전파 적정성을 X-T 선도를 통하여 분석한 결과임. 압력파 거동 분석에 적용된 압력센서는 터널 입구로부터 약 3,114mm(full scale : 200m) 위치해 있으며, 시간 범위는 열차모델의 전두부가 터널 입구에 도달한 이후부터 열차모델 후미부가 터널을 통과한 시점을 포함하고 있음.

○ 터널 진입시간을 0s로 고정하였을 때, 생성된 압력파는 열차보다 먼저 음속으로 PT#02로 전달되고 급격한 압력상승을 보이며 열차의 후미부가 열차통과 시점에서 생성된 팽창파 또한 PT#02에 전달되면 압력이 다시 하강함. 열차모델이 압력센서를 통과하는 시점에서는 열차모델 표면과 터널 벽 사이의 협소해지는 공간으로 인해 압력이 하강하는 것을 알 수 있으며 입구에서 생성된 압축파와 팽창파가 터널 출구에서 다시 반사됨으로써 발생되는 거동 또한 확인할 수 있음. X-T선도 분석을 통해 열차모델이 터널진입으로 발생하는 압력파와 반복적인 반사 과정이 열차모델의 이동과 시간 변화와 일치함을 확인할 수 있음.



<그림 2.1.6b 열차진입속도 180km/h, 200km/h의 압축파 X-T 선도>



<그림 2.1.7b 열차진입속도 250km/h, 275km/h의 압축파 X-T 선도>

(나) 터널모델별 최적 후드모델 성능시험

○ K1터널 미기압파 후드모델 성능시험 주요내용(표 2.1.4b)

- 터널미기압파 저감 후드모델 최적성능 시험에서는 다양한 후드모델 조건에 대하여 효과적으로 시험을 수행하기 위하여 주요 인자를 변화시켜 3단계로 나누고 최적 후드모델을 결정하고자 하였음. 첫 번째 단계[구분 1]로 후드모델의 길이를 결정하기 위한 인서트 부 조정시험을 수행하고 두 번째 단계[구분 2]에서는 수평통풍관의 위치변화 시험을 수행하였음. 마지막으로 후드입구의 형상을 조절하여 슬릿의 개구율과 슬릿 옵션을 적용하여 최종성능을 검증하였음[구분 3].
- 오송종합시험선로 TEST-BED 제 5터널 현장에 실물 스케일의 후드 구조체를 설치하기 위하여 최종 모델을 선정하고 현장 후드 구조체의 성능검증을 위한 PC갱문 개방・폐쇄 비교시험 데이터를 확보하여, 공용 중 후드 구조체의 성능평가를 수행하는 방법을 모색하였음[구분 9].
- 다양한 터널 입・출구 지형조건 상황들을 적용하여 출구의 방사 입체각 패턴, 입구 지형조건등이 대한 터널미기압파 저감 영향에 대하여 비교 분석함[구분 5, 6].

○ K3터널 미기압파 후드모델 성능시험 주요내용(표 2.1.5b)

- K3터널 후드모델 최적성능 시험에서는 1차년도 검증시험을 바탕으로 주요 인자를 일부 참조하여 시험모델을 설계하고 수평통풍관 개방율, 슬릿의 팬스 추가, 슬릿의 개구율 조절등 세부적인 추가 옵션을 조정하여 최적후드모델을 확보하였음[구분 3, 5, 7].
- 후드가 없는 표준 면벽형 터널모델에 대해서 터널에 사갱(side branch)을 적용하여 사갱의 위치가 터널 미기압파 저감에 미치는 영향을 분석하였음[구분 2].
- 50m급 이상의 장대후드모델을 포함하여 후드 길이별 최적 후드모델을 선정하고 입・출구 적용 위치에 따른 터널미기압파 저감 성능을 검증하였음[구분 8].

○ K5터널 미기압파 후드모델 성능시험 주요내용(표 2.1.6b)

- K5터널 후드모델 성능시험은 K1, K3터널 후드모델 최적성능 시험결과와 단면적 변화에 대한 인자를 조정하여 시험모델을 설계하고 일부 옵션을 조정하여 30m급 최적후드모델을 확보하였음[구분 1, 2].
- 후드입구 슬릿의 측면 경사각도 및 슬릿의 팬스등을 적용하여 27m급 후드모델 성능시험도 추가로 수행하였음[구분 4, 5, 6].
- 50m급 이상의 장대후드모델을 포함하여 길이별 최적 후드모델을 선정하고, 터널 입·출구 적용 여부에 따른 터널미기압파 저감 성능을 검증하였음[구분 8].

<표 2.1.4b K1 터널 후드모델 성능시험 목록>

구분	시험모델명	시험조건	주행시험 내용	시험수행 연차 (수록 보고서 번호)
1	CASE-K1A101 CASE-K1A102 CASE-K1A103 CASE-K1A104 CASE-K1A105	• 후드모델 길이 연장시험	• 후드모델 길이변화에 따른 터널미기압파 저감성능 비교 • 최적모델 길이 결정	1차년도 (A-1-2)
2	CASE-K1A106 CASE-K1A107 CASE-K1A108	• 수평통풍관 위치변화시험	• 수평통풍관 위치변화에 따른 터널미기압파 저감성능 비교 • 수평통풍관 위치 결정	1차년도 (A-1-2)
3	CASE-K1B107 CASE-K1C107	• 슬릿 개구율 변화시험	• 후드입구 슬릿 개구율 변화에 따른 터널미기압파 저감성능 비교 • 후드입구 슬릿 개구율 결정	1차년도 (A-1-2)
4	CASE-K1A201 CASE-K1A202 CASE-K1A203 CASE-K1A204 CASE-K1A205	• 길이변화 짧은 후드모델 시험	• 후드입구 슬릿이 없는 수평통풍관 후드모델의 길이변화에 따른 터널미기압파 저감성능 비교	1차년도 (A-1-2)
5	CASE-K1S101 CASE-K1S102 CASE-K1S103 CASE-K1S104 CASE-K1S105 CASE-K1S106	• 터널출구 외부 사면 적용 시험	• 터널출구 사면적용에 따른 입체각 변화 및 터널 출구 미기압파의 영향 분석	2차년도 (A-1-2-1)
6	CASE-K1FD107-1 CASE-K1FD107-2 CASE-K1FD107-3 CASE-K1FD107-4 CASE-K1FD107-5	• 터널입구 외부 사면 적용시험	• 터널입구 사면적용에 따른 터널 출구 미기압파의 영향 분석	2차년도 (A-1-2-1)
7	CASE-K1CH107-1 CASE-K1CH107-2 CASE-K1CH107-3 CASE-K1CH107-4	• 후드슬릿 팬스 형상 변화 적용시험	• 후드슬릿 팬스의 형상 변화에 따른 미기압파 저감 후드 최적설계	2차년도 (A-1-2-1)

8	CASE-K1TG101 CASE-K1TG102 CASE-K1TG103	• 공용 중 후드 구조체의 풍하중 시험	• 공용 중 후드 구조체 설치에 따른 공정별 풍하중 예측	2차년도 (A-1-2-1)
9	CASE-EP107 CASE-EP107-1 CASE-107-PCP CASE-REF-PCP	• 후드가 적용된 PC갱문 개방·폐쇄 시험	• 오송시험선 후드 시작품의 현장시험을 위한 PC갱문 개방·폐쇄 시험	2차년도 (A-1-2-1)

<표 2.1.5b K3 터널 후드모델 성능시험 목록>

구분	시험모델명	시험조건	주행시험 내용	시험수행 연차 (수록 보고서 번호)
1	CASE-K3REF CASE-K3001 CASE-K3002 CASE-K3003 CASE-K3004 CASE-K3005	• 기초환경조건 시험	• 터널 입·출구에서 실제 적용하고 있는 다양한 기초환경조건들에 대한 공기역학적인 기본 데이터 확보(경사갱문 등)	2차년도 (A-1-2-2)
2	CASE-K3A17V_1 CASE-K3A17V_2 CASE-K3A17V_3	• 터널 내 사갱 적용 시험	• 터널 내부 위치별 사갱 적용에 따른 미기압파 저감성능 평가	2차년도 (A-1-2-2)
3	CASE-K3A17_1 CASE-K3A17_2 CASE-K3A17_2-2 CASE-K3A17_2-3 CASE-K3A17_3	• 최적설계의 K3A107후드 적용 시험	• A107후드모델 적용 및 수평통풍관 개방율 변화에 따른 최적모델 개발시험	2차년도 (A-1-2-2)
4	CASE-K3A21_2 CASE-K3A25_2	• K3A201, K3A205후드 적용 시험	• 짧은 후드 개발시험	2차년도 (A-1-2-2)
5	CASE-K3A17_4 CASE-K3A17_5 CASE-K3A17_5-2 CASE-K3A17_5-3 CASE-K3A17_6	• K3터널 펜스형 후드모델 적용 시험	• 후드 슬릿의 펜스 설치 모델 적용 및 수평통풍관 개방율 변화에 따른 최적모델 개발 시험	2차년도 (A-1-2-2)
6	CASE-K3A21EX_1 CASE-K3A21EX_2 CASE-K3A25EX_1 CASE-K3A25EX_2 CASE-K3A17EX_1 CASE-K3A17EX_2	• K3터널 입·출구 후드적용 비교시험	• 터널 입·출구 후드의 적용 및 상호비교 시험	2차년도 (A-1-2-2)

7	CASE-K3A17S_4-3 CASE-K3A17S_4-5 CASE-K3A17S_4-7 CASE-K3A17S_4-9 CASE-K3A17S_4-10 CASE-K3A17S_5 CASE-K3A17S_6 CASE-K3A17S_7 CASE-K3A17S_8	• 굴뚝/슬릿 판 설치 후드 모델 적용시험	• 후드 슬릿의 굴뚝/판 설치 및 매개변수 변화에 따른 최적모델 개발 시험	2차년도 (A-1-2-2)
8	CASE-K3LH101 CASE-K3LH102 CASE-K3LH103 CASE-K3LH104 CASE-K3LH103FE CASE-K3LH103E CASE-K3LH105 CASE-K3LH106 CASE-K3LH107	• K3터널 장대후드모델 상부통풍관 높이 및 수평통풍관 적용 시험	• K3터널 주요 인자별 변경에 따른 장대후드모델 최적성능 후드모델 개발시험	3차년도 (A-1-2)

<표 2.1.6b K5 터널 후드모델 성능시험 목록>

구분	시험모델명	시험조건	주행시험 내용	시험수행 연차 (수록 보고서 번호)
1	CASE-K5A17_1 CASE-K5A17_2 CASE-K5A17_3 CASE-K5A17_4 CASE-K5A17_4-1 CASE-K5A17_5	• 30m급 후드모델 수평통풍관 위치변화 시험	• 30m급 후드모델의 수평통풍관 위치변화의 터널미기압파 저감성능 비교시험	3차년도 (A-1-2)
2	CASE-K5A17S_5 CASE-K5A17S_5-2 CASE-K5A17S_4-10 CASE-K5A17S_7	• 30m급 후드모델의 후드입구 슬릿 옵션 변경	• 후드입구 슬릿의 팬스, 가림막 적용 변경에 따른 최적성능모델 개발시험	3차년도 (A-1-2)
3	CASE-K5A17S_5-2FE	• 후드모델 터널 입·출구 적용 시험	• 터널 입·출구 적용 위치에 따른 최적성능모델 터널미기압파 데이터 확보	3차년도 (A-1-2)
4	CASE-K5A18_1 CASE-K5A18_2 CASE-K5A18_3 CASE-K5A18_4	• 27m급 후드모델(측면 슬릿 경사각 30°) 수평통풍관 개방율 및 슬릿 개구율 변화시험	• 27m급 후드모델(측면 슬릿 경사각 30°) 터널미기압파 저감성능 비교시험	3차년도 (A-1-2)

5	CASE-K5A19 CASE-K5A19_1 CASE-K5A19_2 CASE-K5A19_3	• 27m급 후드모델(측면 슬릿 경사각 34.7°) 의 수평통풍관 개방율 변화시험	• 27m급 후드모델(측면 슬릿 경사각 34.7°) 터널미기압파 저감성능 비교시험	3차년도 (A-1-2)
6	CASE-K5A19S_4-10 CASE-K5A19S_5-2 CASE-K5A19_10	• 27m급 후드모델(측면 슬릿 경사각 30°) 후드입구 슬릿 옵션변경시험	• 27m급 후드모델(측면 슬릿 경사각 30°) 최적성능모델 개발시험	3차년도 (A-1-2)
	CASE-K5A21_1 CASE-K5A21_2 CASE-K5A25_1	• 짧은 후드모델의 수평통풍관 개구율 변화시험	• 후드입구 슬릿이 없는 짧은 후드모델의 터널미기압파 저감성능 비교시험	3차년도 (A-1-2)
7	CASE-K5A21_1FE CASE-K5A25_1FE	• 짧은 후드모델의 터널 입·출구 적용별 시험	• 짧은 후드모델의 터널 입·출구 적용에 따른 터널미기압파 저감성능 비교시험	3차년도 (A-1-2)
8	CASE-K5LH101 CASE-K5LH102 CASE-K5LH103	• K5터널 장대후드모델의 상부통풍관 높이변화 시험	• K5 터널 장대후드모델의 상부 통풍관 높이변화에 따른 최적성능모델 개발시험	3차년도 (A-1-2)
9	CASE-K5LH103FE	• K5터널 장대후드모델의 터널 입·출구 적용별 시험	• K5터널 장대후드모델의 터널 입·출구 적용에 따른 터널미기압파 저감성능 비교시험	3차년도 (A-1-2)

(다) 열차모델 터널주행시험 조건

○ 열차모델 터널주행시험기를 활용한 터널 미기압파 저감 후드모델 비교시험의 정량적 평가를 위해서는 동일환경 및 시험조건이 중요하며, 본 연구에서는 동일환경을 위해 실내의 대기압, 온·습도를 발사 시험 전 상시 체크하여 시험을 진행하였음. 동일 조건을 위하여 열차모델이 터널 주행시험기의 실험부 진입 전 트리거 센서를 이용하여 센서가 감지하면 2초간 모든 신호를 동시에 계측하고 25kHz의 샘플링 주파수로 데이터를 일괄 저장하도록 시스템화하였음.

○ K1, K3, K5터널모델 각각의 열차모델 진입속도는 현장 운행조건 범위를 포함하여 속도조건을 적용하였음. K1터널과 K3터널은 180km/h, 200km/h, 250km/h, 275km/h의 속도범위에서 시험을 진행하고, K5터널 경우 200km/h, 250km/h, 300km/h, 320km/h 범위 내에서 시험을 진행하며 각각 3회 이상 실험을 수행하였음. 또한 실험실 내부의 대기압과 온도에 따른 속도변화를 보정하기 위해, 공기압 실린더 내부의 발사압력을 조절하여 열차모델 속도를 기준에 맞추었고 속도에 대한 오차가 1% 이내의 데이터만을 획득하였음.

(3) 터널미기압파 저감후드 최적성능모델 개발시험 결과

(가) 터널별 주요 시험모델의 시험수행 결과

○ 본 시험에서는 250km/h급 고속화철도 터널 미기압파 저감 후드를 개발하기 위하여 초고속 열차모델 터널 주행시험기를 운용하여 K1, K3, K5 터널별 후드 내부의 수평통풍관 위치, 후드 연장, 후드 입구의 슬릿개구율 및 슬릿의 펜스 설치 등의 여러 인자를 비교분석하여 생체모사형 후드모델의 성능시험을 수행하고 터널 단면적별로 5종의 모델과 3개 터널에서 총 15종의 최적성능모델을 개발하였음. 운행현장에 시공되는 K3터널, K5터널 후드모델의 경우 길이별 최고성능을 보이는 모델을 선정하여 터널 입구와 출구 그리고 입·출구에 동시 적용 조건을 수행하여 터널 미기압파 저감 후드 적용성능의 최적 데이터를 추가로 확보하였음.

○ 3종 터널의 최적성능 후드모델에 대한 주요 선정기준은 기초환경조건의 면벽형 모델을 기준으로 측정된 터널 미기압파 데이터를 비교하여 평가하였으며 경제적, 공간적 제약 등을 고려하여 후드 길이별로 최적성능모델을 추가하였음. K3, K5터널에서는 미기압파 저감율 면에서 고성능을 낼 수 있는 후드연장 50m급 이상의 상부통풍관형 장대후드모델의 성능평가도 수행하여 데이터를 확보하였음.

○ 터널 미기압파 저감 후드모델의 최적설계 성능평가 주행시험 이외에도 3차년도 오송 종합시험선로의 실물 스케일의 후드 구조체에 대한 현장시험 대책으로 터널 PC갱문 개·폐 비교시험을 수행하였고, 후드가 없는 면벽형 터널모델에서 사갱(side brench) 적용 위치별 터널미기압파 저감성능을 비교분석 하였음.

(나) K1터널 적용 최적성능 후드모델

<표 2.1.7b. K1터널 최적성능 후드모델의 입구적용 시험결과>



구분	열차진입속도 (km/h)	후드 길이(mm)	터널미기압파 최대값(Pa)	터널미기압파 저감율(%)
CASE-REF	250	Without Hood	28.53	Reference
CASE-K1A201	250	122 (Full scale = 7.8m)	15.30	46.4
CASE-K1A205	250	222 (Full scale = 14.2m)	11.10	61.1
CASE-K1A107	250	419 (Full scale = 26.9m)	6.07	78.7
CASE-K1CH107-1	250	419 (Full scale = 26.9m)	5.72	79.9
CASE-K1CH107-3	250	419 (Full scale = 26.9m)	5.26	81.6

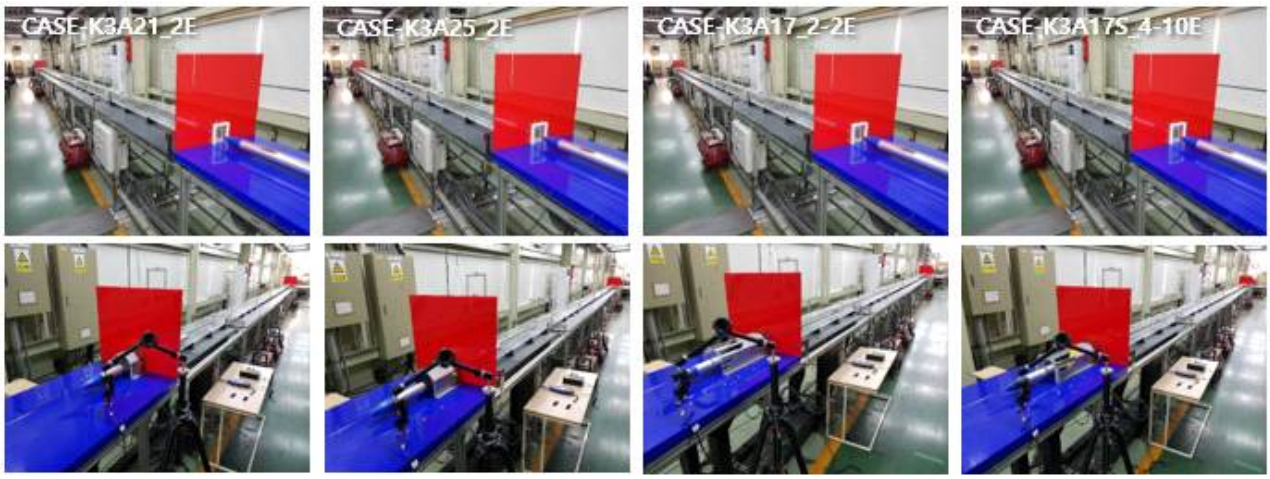
(다) K3터널 적용 최적성능 후드모델

<표 2.1.8b. K3터널 최적성능 후드모델의 입구적용 시험결과>



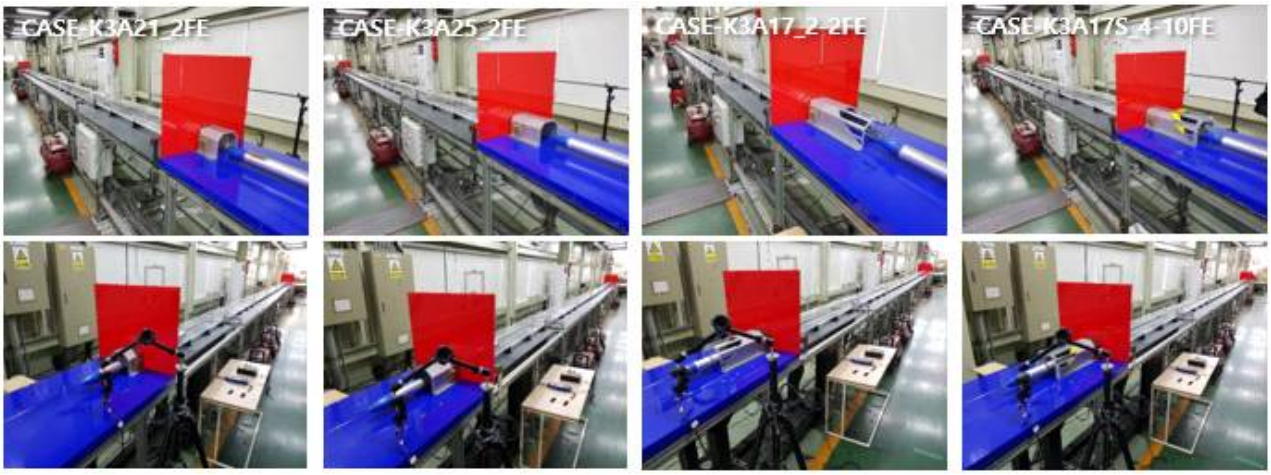
구분	열차진입속도 (km/h)	후드 길이(mm)	터널미기압파 최대값(Pa)	터널미기압파 저감율(%)
CASE-REF	250	Without Hood	47.22	Reference
CASE-K3A21_2	250	122 (Fullscale = 7.8m)	21.33	54.8
CASE-K3A25_2	250	222 (Fullscale = 14.2m)	16.00	66.1
CASE-K3A17_2-2	250	418 (Fullscale = 26.8m)	9.06	80.8
CASE-K3A17S_7	250	418 (Fullscale = 26.8m)	8.00	82.1
CASE-K3A17S_4-10	250	418 (Fullscale = 26.8m)	7.73	83.6

<표 2.1.9b. K3터널 최적성능 후드모델의 출구적용 시험결과>



구분	열차진입속도 (km/h)	후드 길이(mm)	터널미기압파 최대값(Pa)	터널미기압파 저감율(%)
CASE-REF	250	Without Hood	47.22	Reference
CASE-K3A21_2E	250	122 (Full scale = 7.8m)	36.56	22.6
CASE-K3A25_2E	250	222 (Full scale = 14.2m)	12.10	26.6
CASE-K3A17_2-2E	250	418 (Full scale = 26.8m)	23.49	50.2
CASE-K3A17S_4-10E	250	418 (Full scale = 26.8m)	27.30	42.2

<표 2.1.10b. K3터널 최적성능 후드모델의 입·출구 동시적용 시험결과>



구분	열차진입속도 (km/h)	후드 길이(mm)	터널미기압파 최대값(Pa)	터널미기압파 저감율(%)
CASE-REF	250	Without Hood	47.22	Reference
CASE-K3A21_2FE	250	122 (Full scale = 7.8m)	15.98	66.2
CASE-K3A25_2FE	250	222 (Full scale = 14.2m)	11.60	75.4
CASE-K3A17_2-2FE	250	418 (Full scale = 26.8m)	4.49	90.5
CASE-K3A17S_4-10FE	250	418 (Full scale = 26.8m)	4.50	90.5

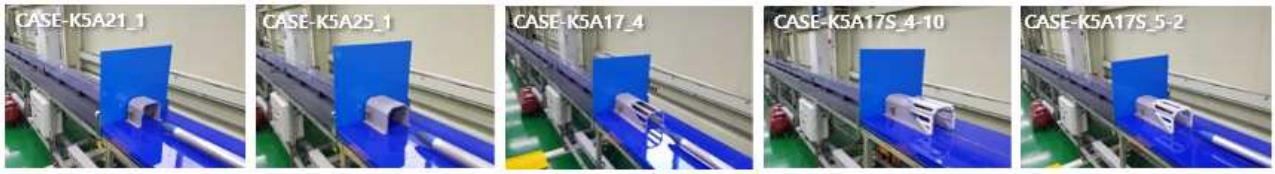
<표 2.1.11b. K3터널 장대후드모델의 터널 입구 및 입·출구 적용 시험결과>



구분	열차진입속도 (km/h)	후드 길이(mm)	터널미기압파 최대값(Pa)	터널미기압파 저감율(%)
CASE-REF	250	Without Hood	47.22	Reference
CASE-K3LH103	250	812 (Full scale = 52.1m)	6.97	85.2
CASE-K3LH103FE	250	812 (Full scale = 52.1m)	3.71	92.1

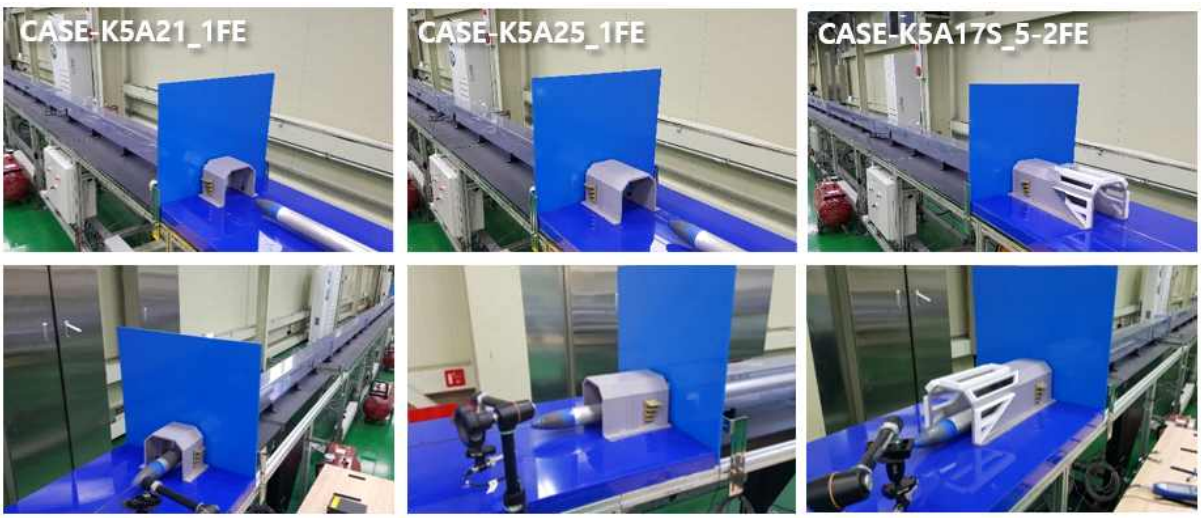
(라) K5터널 적용 최적성능 모델

<표 2.1.12b. K5터널 최적성능 후드모델의 입구적용 시험결과>



구분	열차진입속도 (km/h)	후드 길이(mm)	터널미기압파 최대값(Pa)	터널미기압파 저감율(%)
CASE-REF	300	Without Hood	53.81	Reference
CASE-K5A21_1	300	122 (Full scale = 7.8m)	31.29	41.8
CASE-K5A25_1	300	222 (Full scale = 14.2m)	20.32	62.2
CASE-K5A17_4	300	462 (Full scale = 29.7m)	10.74	80.0
CASE-K5A17S_4-10	300	462 (Full scale = 29.7m)	10.09	81.3
CASE-K5A17S_5-2	300	462 (Full scale = 29.7m)	9.15	83.0

<표 2.1.13b. K5터널 최적성능 후드모델의 입·출구 동시적용 시험결과>



구분	열차진입속도 (km/h)	후드 길이(mm)	터널미기압파 최대값(Pa)	터널미기압파 저감율(%)
CASE-REF	300	Without Hood	53.81	Reference
CASE-K5A21_1FE	300	122 (Full scale = 7.8m)	26.60	50.6
CASE-K5A25_1FE	300	222 (Full scale = 14.2m)	16.46	69.4
CASE-K5A17S_5-2FE	300	462 (Full scale = 29.7m)	5.27	90.2

<표 2.1.14b. K5터널 장대후드모델의 터널 입구 및 입·출구 적용 시험결과>

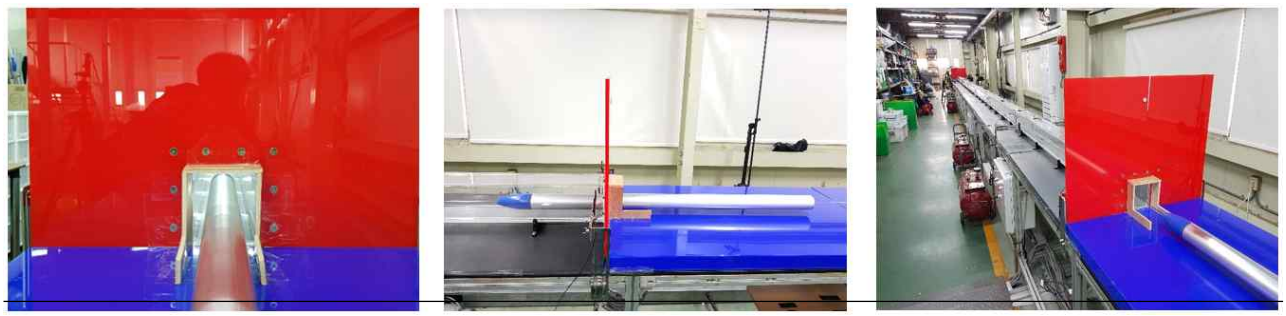


구분	열차진입속도 (km/h)	후드 길이(mm)	터널미기압파 최대값(Pa)	터널미기압파 저감율(%)
CASE-REF	300	Without Hood	53.81	Reference
CASE-K5LH103	300	812 (Full scale = 52.1m)	7.1	86.8
CASE-K5LH103FE	300	812 (Full scale = 52.1m)	5.8	89.2

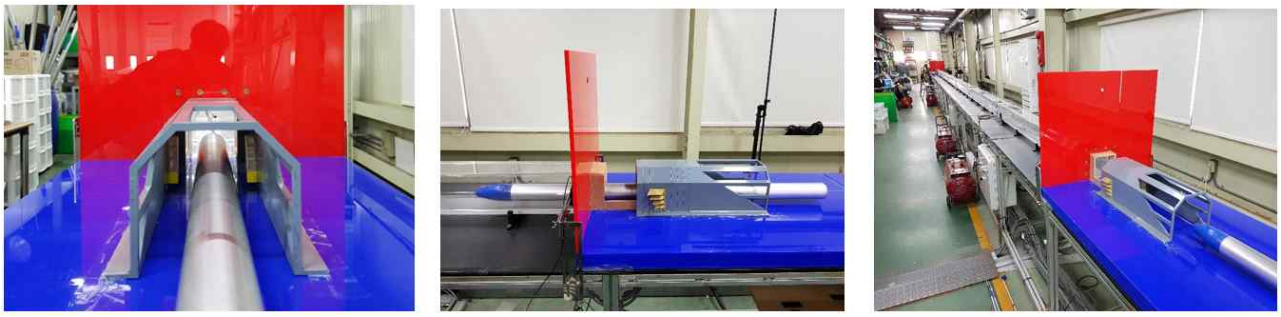
(마) 오송 종합시험선로 후드 구조체 현장시험 대책

○ K1터널 PC갱문의 개방·폐쇄 조건 비교시험 결과

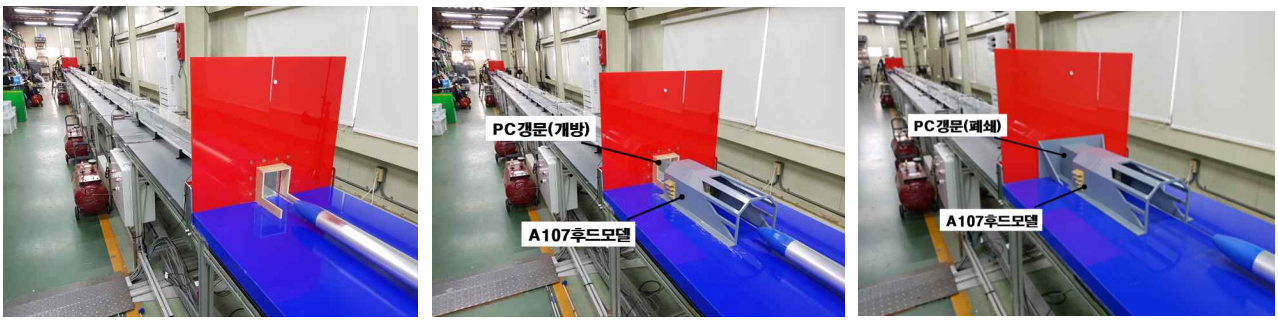
- 터널 갱구 앞 후드 유무에 대한 현장 성능검증 대책으로 후드 구조체와 터널 사이의 PC갱문(개착터널)의 개방/폐쇄에 따른 터널 출구의 미기압파 영향을 비교 분석하였음.
- 그림 2.1.8b, 그림 2.1.9b는 각각 CASE-REF-PCP(후드 미설치)모델과 CASE-107-PCP(PC 갱문 개방 및 후드설치)모델이며 터널 출구조건은 45도 경사갱구를 적용하였음. 해당 시험들은 기존에 시험하였던 그림 2.1.10b (c)의 CASE-K1A107ES(CASE-A107ES, ES : 터널출구 경사갱구 모델)와 상호 비교하였으며, 그림 2.1.11b와 같이 후드 미설치 모델과 비교하여 PC갱문 개방 및 후드설치 모델의 터널 미기압파 최대값이 열차의 진입속도별로 같거나 오히려 높아지는 경향을 보였음. 이와 같은 결과를 바탕으로 공용 중 후드 설치 중에도 PC갱문을 개방하여 후드모델이 없는 효과를 적용할 수 있으며 2차년도 오송 종합 시험선의 후드 시작품의 테스트-베드 현장 성능평가를 위한 자료로서 활용하였음.



<그림 2.1.8b CASE-REF-PCP 시험모델>

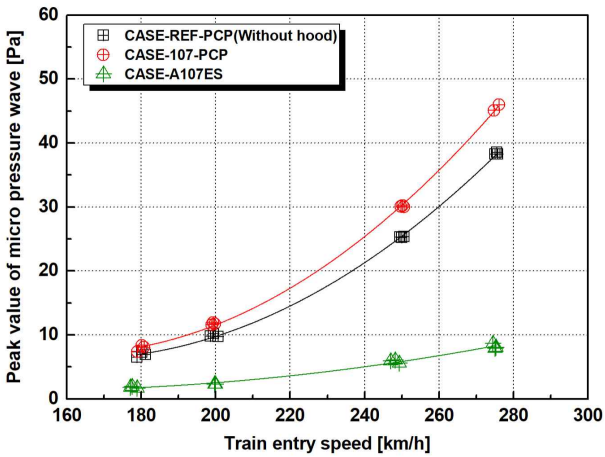


<그림 2.1.9b CASE-107-PCP 시험모델(PC갱문 개방, K1A107 후드모델 적용)>



(a) CASE-REF-PCP (b) CASE-PCP-A107 (c) CASE-A107ES

<그림 2.1.10b PC갱문 개·폐 조건에 의한 실내주행시험 터널입구 전경>

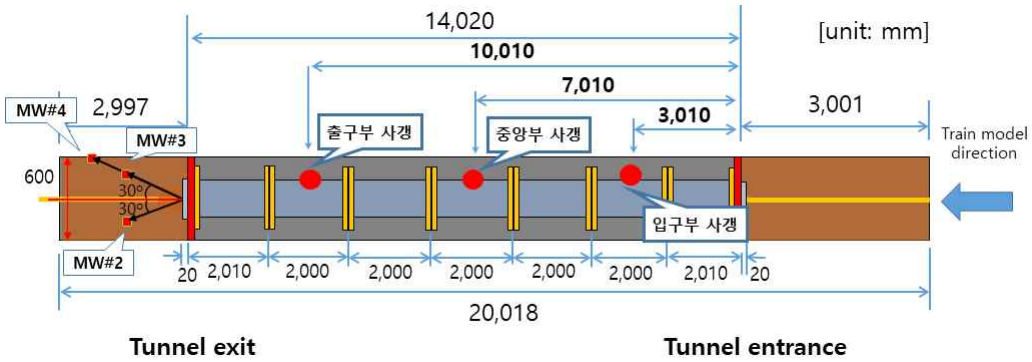


<그림 2.1.11b PC갱문 개방에 의한 터널미기압파 저감영향 비교분석 결과>

(바) 터널 내부 사갱적용 모델 시험결과

○ 터널 입·출구가 면벽형 조건에서 터널 단면적은 9,697mm^2(실척: 39.97m^2)이고, 사갱단면적 대비 터널단면적 비율(blockage ratio)이 0.105인 사갱을 터널 입구영역, 중앙영역, 출구영역에 설치하여 터널 미기압파 저감 효과를 비교분석 하였음(그림 2.1.12b, 그림 2.1.13b). 터널 측벽으로부터 사갱의 길이는 수평방향으로 264.9mm(실척 : 17.0m) 수직방향으로 768.6mm(실척 : 49.3m)임. 시험 진행은 각 사갱별로 개별 진행하여 하나의 위치

에서 사갱 개방시험을 진행하면 나머지 두 개의 사갱은 폐쇄하여 시험을 진행함. 시험결과, 열차진입속도별로 터널 미기압파 저감율을 분석하였을 때 CASE-K3A17V_1(입구부 사갱적용), CASE-K3A17V_2(중앙부 사갱적용), CASE-K3A17V_3(출구부 사갱적용) 시험조건에서 열차진입속도 250km/h기준으로 각각 11.9%, 10.6%, 11.7%의 터널미기압파 저감율을 보였음. 주요 시험결과는 표 2.1.15b에 나타내었음.



<그림 2.1.12b K3터널 위치별 사갱적용 개요도>



<그림 2.1.13b K3터널 사갱적용 시험모델 전경>

<표 2.1.15b 사갱 적용 위치별 터널미기압파 저감영향 비교>

구분	열차진입속도 (km/h)	터널 입구에서 사갱 위치(mm)	터널미기압파 최대값(Pa)	터널미기압파 저감율(%)
CASE-REF	250	사갱 없음	47.22	Reference
입구부 사갱 적용 (CASE-K3A17V_1)	250	3,010 (Full scale = 193m)	41.62	11.9
중앙부 사갱 적용 (CASE-K3A17V_2)	250	7,010 (Full scale = 450m)	42.23	10.6
출구부 사갱 적용 (CASE-K3A17V_3)	250	10,010(Full scale = 707m)	41.68	11.7

(사) 터널미기압파 저감후드 최적성능모델 개발시험에 대한 공인기관 시험성적서

○ 성과점검기준에서 “후드 구조체의 미기압파 저감 최적설계 방법 적합성”(A-1-1)과 “열차속도, 터널단면적, 터널연장별 등 주요인자를 고려한 최적후드 표준사양 개발”(A-1-2)에 대한 공인시험성적서를 KTL(한국산업기술시험원)로부터 다음과 같이 각각 발급 받았음.



<그림 2.1.14b 터널주행 열차모델 주행시험기에 의한 고효율 후드에 대한 KTL 공인시험성적서>



<그림 2.1.15b 터널주행 열차모델 주행시험기에 의한 고효율 후드 표준사양개발에 대한 KTL 공인시험성적서>

다. TEST-BED에서의 후드 구조체의 미기압파 저감 성능

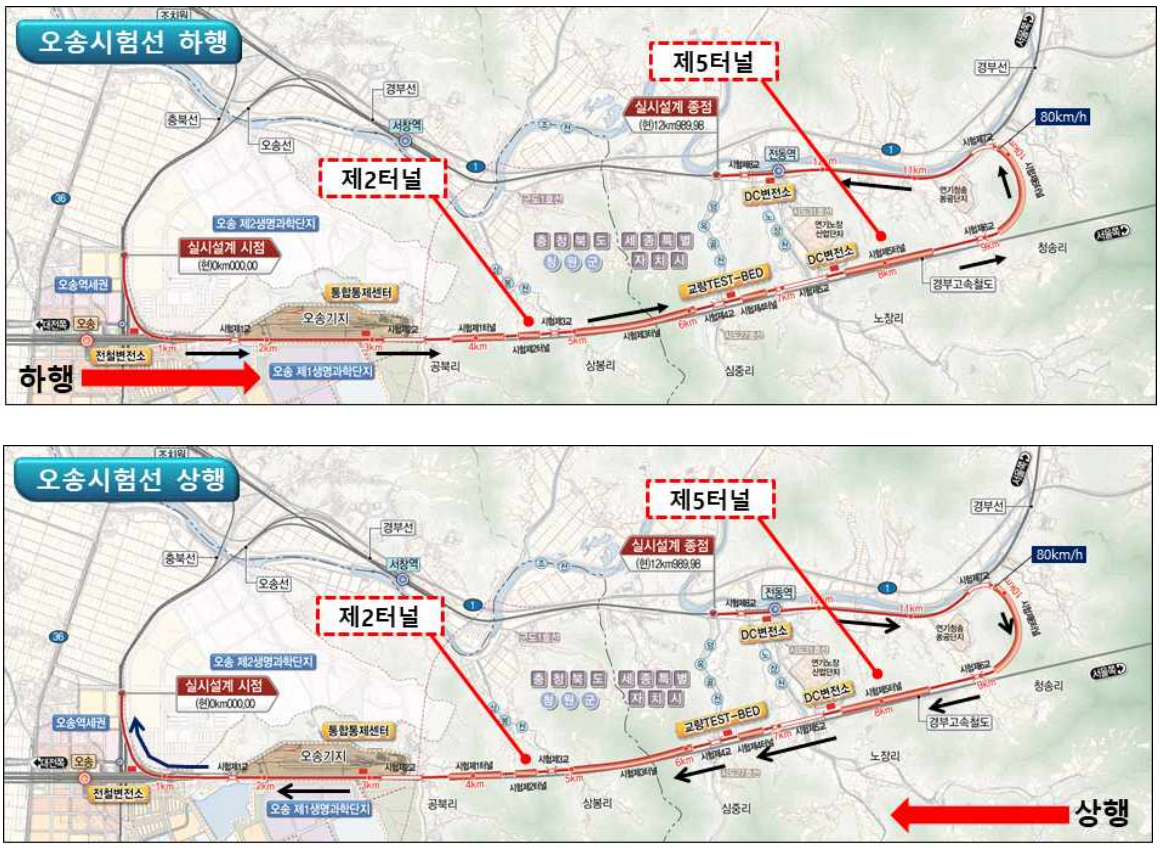
(1) 오송 종합시험선로 TEST-BED 후드 구조체 성능시험

(가) 오송 종합시험선로 시험 제 5터널

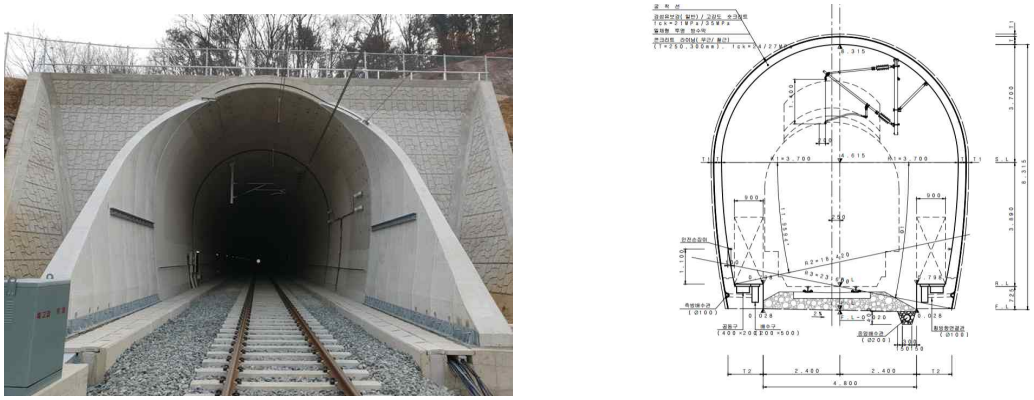
○ 오송 종합시험선로[그림 2.1.1c]는 터널 6개소를 포함하여 총 연장 12.9km의 국내 유일의 철도시험 전용선로임. 주요 TEST-BED 구간인 시험 제5터널[그림 2.1.2c]은 오송 종합시험선로 시점으로부터 7.5km 지점에 위치한 연장 905m의 단선터널임. 터널의 입구형상은 말발굽 형태이며 터널 내공단면적은 50.3m^{2}임.

○ TEST-BED 현장시험에 운용된 운행열차는 동일조건의 시험환경을 이루기 위해 후드 성능시험 1차와 2차 모두 10량1편성의 KTX-원강[그림 2.1.3c] 고속열차가 적용되었음. 해당 열차의 영업운행속도는 최고 300km/h이므로 본 현장시험 조건에 적합함.

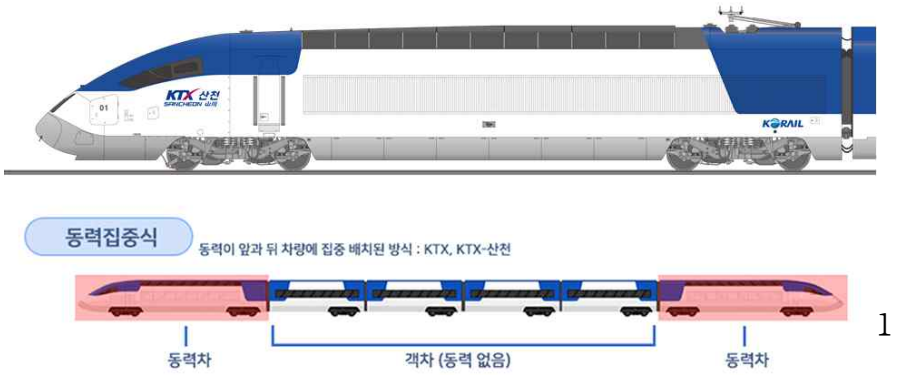
○ 시험 제5터널 입구에 설치된 후드 구조체는 상어 생체모사를 적용한 수평통풍관형 후드(Shark hood, 상어 후드)로서, 본 기술개발의 1차년도에 1/64.2 축척 초고속 열차모델 터널주행시험을 통하여 도출된 최적 성능의 후드 모델임. 표 2.1.1c에 터널과 후드 구조체의 주요 제원을 정리하였음.



<그림 2.1.1c 오송종합시험선로 TEST-BED 시험의 제2터널과 제5터널>



<그림 2.1.2c 제 5터널 종점(좌)과 터널단면도(우)>



<그림 2.1.3c TEST-BED 현장시험 운행열차 KTX-산천>

<표 2.1.1c 시험 제5터널 현장시험 주요 제원>

형식		분리/조립형
열차	운행열차	강릉선 KTX-산천(원강) (10량 1편성)
	열차길이	201m
	영업최고속도	300km/h
	열차단면적	10m^2
터널	터널 유효단면적	50.3m^2
	터널길이	905m(PC갱문 포함 911m)
	궤도	발라스트 궤도
	기타	터널 내부의 통합 기재갱 2개소
열차/터널 단면적 비 (Blockage ratio)		0.1988

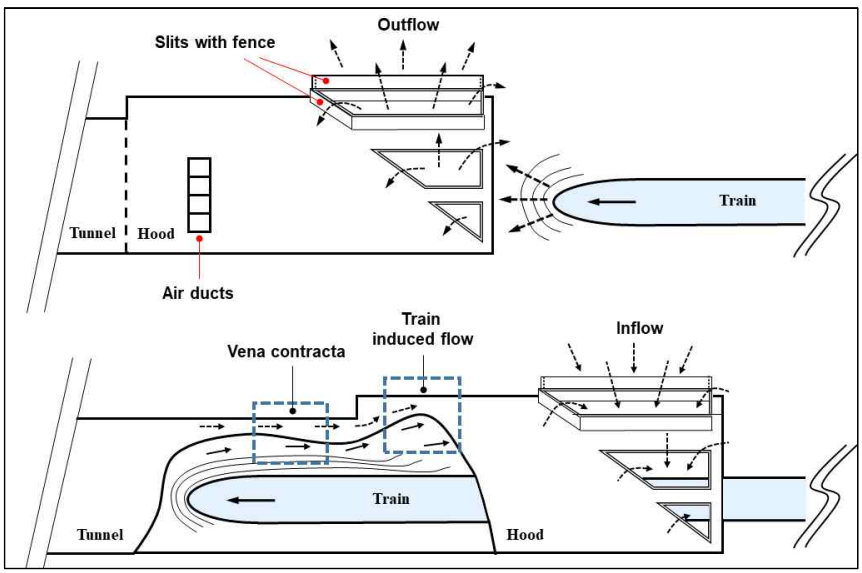
(나) 고성능 터널 미기압파 저감 후드모델 설계

○ 상어 생체모사형 후드모델은 본 기술개발의 1차년도에 축소모형 성능평가를 통해 개발한 최적 성능모델로써[그림 2.1.4c] 후드 구조체의 입구부에 슬릿(slit)을 7개소에 적용하고, 후드 구조체 내부의 양쪽 측면에 수평통풍관(air ducts)이 설치되어 있음. 슬릿 외부면에는 높이 방향으로 연장한 펜스(fence)가 설치되어 있으며 펜스의 형상은 후드 입구 방향으로 높이가 줄어드는 경사진 형상을 지님.

○ 그림 2.1.5c는 고속열차가 진입할 때 발생하는 후드 내부 유동 흐름을 도식화한 것으로 고속열차의 후드 진입 전에 발생하는 압축파가 후드 입구의 슬릿을 통해 일차적으로 압축되는 공기를 배출하고 후드 내부에 설치된 수평 통풍관에서 2차로 압축되는 공기를 배출시켜 터널입구 내부에서의 급격한 압력상승을 지연시키는 효과를 가짐. 이후 열차가 터널에 진입하게 되면 축류 현상으로 다시 슬릿을 통해 외기를 흡입하는 현상이 발생하는데, 슬릿 외부에 설치된 펜스가 흡입되는 외기의 압력상승을 추가로 지연시키는 기능을 하게 됨.



<그림 2.1.4c 제5터널 시점에 설치된 후드 구조체 현장사진(상어 후드)>



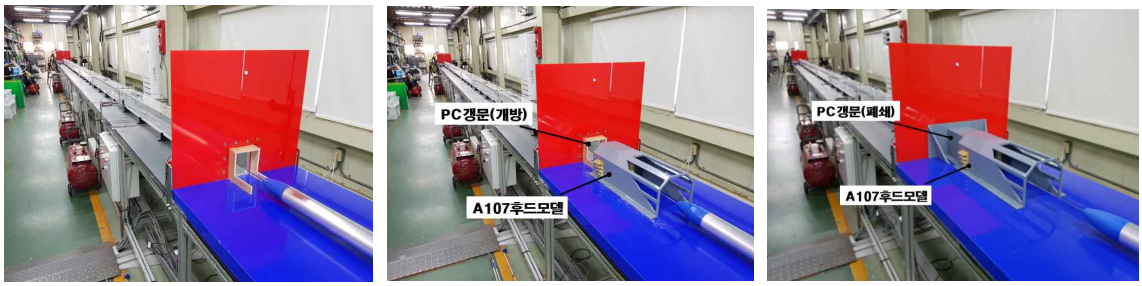
<그림 2.1.5c 열차진입에 의한 상어 후드 구조체 주변의 유동 개요도>

(다) 후드 구조체 성능검증 시험방법

○ 후드 구조체의 터널 출구 미기압파 저감 성능에 대한 정량적 평가를 위해서는 동일한 조건의 현장 상황에서 ①터널입구에 후드가 적용되지 않은 일반터널의 갱문 조건과 ② 터널 입구에 후드가 설치된 조건에서 터널 출구 외부의 미기압파 계측시험 결과를 통하여 상호 비교분석을 수행해야 함. 이러한 2가지 조건을 순차적으로 적용하기에는 오송시험선 개통시점에서 2년간의 연구기간이 부족하고 비효율적이므로 본 시험에서는 1차년도 축소모형 주행시험 결과 중[그림 2.1.6c] 후드 구조체와 터널 사이의 PC갱문의 개방·폐쇄 조건이 후드 구조체의 적용 유·무 시험결과와 상당한 일치를 보이는 선행 연구결과를 바탕으로, 후드 구조체와 터널 사이의 PC갱문의 개방·폐쇄 조건 성능평가를 수행하는 방법을 선택하였음.

○ 그림 2.1.6c의 (a), (b), (c)는 각각 “후드가 없는 시험모델”, “후드설치와 PC갱문 개방조건 시험모델”, “후드설치와 PC갱문 폐쇄조건 시험모델”들이며 그림 2.1.9c의 결과와 같이 “후드가 없는 시험모델”에 대비하여 “후드설치와 PC갱문 개방조건 시험모델”이 열차진입속도별로 경향이 흡사하고 터널 미기압파의 크기는 오히려 더욱 증대되는 것을 확인하였음.

○ 1차년도 축소모형 시험결과를 오송시험선 테스트-베드 제5터널에 설치된 후드 구조체의 성능검증 현장시험에 적용하기 위하여, 그림 2.1.8c와 같이 후드 1차 성능시험에서는 후드와 터널 사이를 연결하는 PC갱문을 골조만 유지하고 외부로 개방시켜 ‘후드가 없는 조건’을 구현하여 현장실험하고, 후드 2차 성능시험에서는 다시 PC갱문의 골조에 패널을 덮어서 기밀 함으로서 ‘후드 설치 조건’을 구현하여 현장시험을 수행하였음.



(a) CASE-REF-PCP (b) CASE-PCP-A107 (c) CASE-K3A107ES

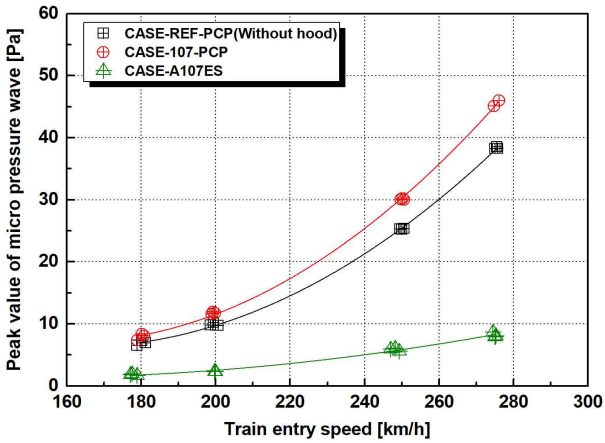
<그림 2.1.6c PC갱문 개·폐 조건에 의한 실내주행시험 터널입구 전경>



<그림 2.1.7c PC갱문 개·폐 조건에 의한 실내주행시험의 터널출구 전경>




<그림 2.1.8c 후드 구조체 PC갱문 개・폐 전경>



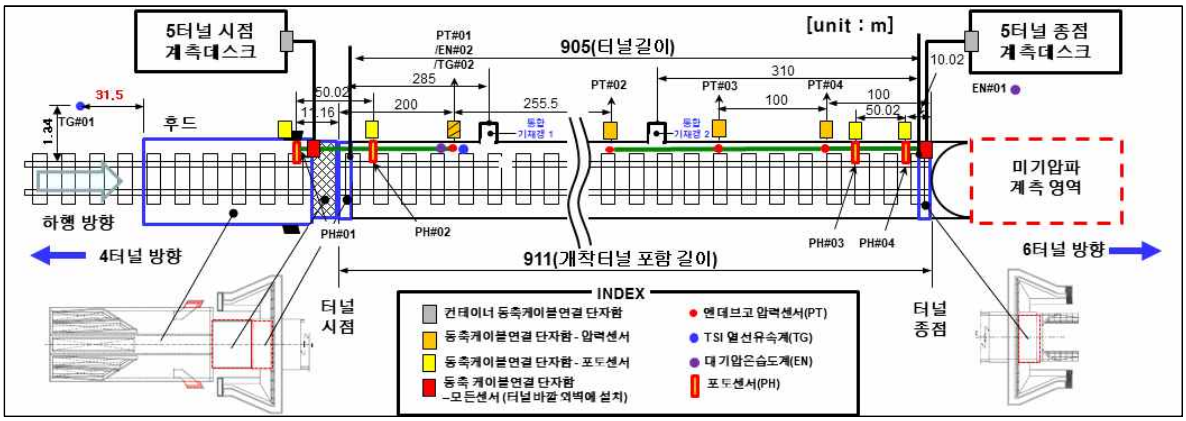
<그림 2.1.9c PC갱문 개・폐 조건에 의한 실내주행시험 결과>

(라) TEST-BED의 제 5터널 현장계측시스템

○ TEST-BED 후드 구조체의 공기역학적 성능 계측시스템

- TEST-BED 시험 제5터널의 터널 공기역학 특성분석 및 고속열차의 터널진입으로 발생하는 압축파의 압력변동량을 분석을 위하여 그림 2.1.10c와 같이 현장계측시스템을 구축하였음. 터널 내부에는 압력파의 압력변동량을 계측하기 위하여 4개소에 압력센서(ENDEVCO 8510B-2, range: 2 PSI)를 설치하였으며, 터널 시점과 터널 내부에는 열차진입 전・후에 의한 풍속 및 대기압, 온도, 습도를 계측하기 위하여 열선유속계(TSI-8465)와 대기압 온・습도계(Lutron MHB-382SD)를 설치하여 계측하였음[그림 2.1.11c].
- 주행시험에서 터널 내부의 압력변동량은 압력센서와 연결된 시그널컨디셔너(ENDEVCO, Model 126)으로부터 계측 데스크까지 동축케이블로 연결하고 계측 데스크의 데이터 로거(HIOKI, MR8875)에 데이터를 전송하여 저장하였음. 시그널 컨디셔너의 전원공급은 시그널 컨디셔너 하부 바닥에 설치된 리튬이온 베터리(DC 12V)를 통해 공급되는데 시그널 컨디셔너의 전원 입력이 AC 220V이기 때문에 인버터를 통해 DC 12V에서 AC 220V로 승압하여 공급하였음[그림 2.1.11c].

- 열차의 터널 진입속도와 진출속도는 터널 내부의 입구부와 출구부에서 각각 2개소(총 4개소)의 포토센서(Keyence, PZ-G41N)[그림 2.1.12c]를 침목위에 설치하여 두 지점의 거리와 열차의 포토센서 통과시간을 계측하여 속도를 산정하였음.
- 터널 미기압파 계측은 터널 종점 외부의 개활지에 마이크로폰(RION microphone UC-59L, 본체는 RION NL-62) 6개소[2.1.14c]를 설치하여 측정하였으며 터널 종점으로부터 거리측정의 시작지점이 다른 A 계측지점(2개소)과 B 계측지점(4개소)으로 나누어 각각 계측데이터를 확보하였음. [그림 2.1.13c]는 터널 미기압파 계측 위치를 표시한 것으로 A와 B 계측지점들을 표기하였으며 표 2.1.2c에 현장시험에 사용된 계측 장비들의 설정 조건들을 정리하였음.



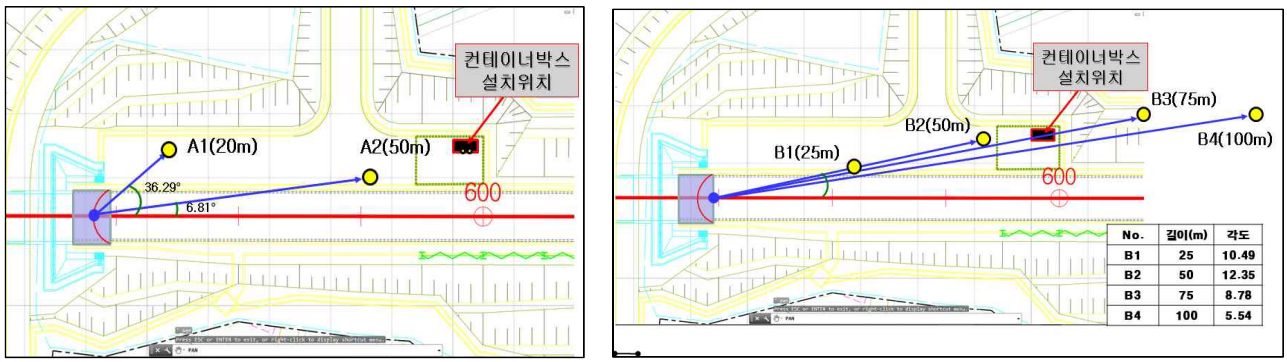
<그림 2.1.10c 시험 제5터널 주요 계측시스템 구축 개요도>



<그림 2.1.11c 터널 내부 압력/풍속/대기압 온·습도 계측 시스템 설치 전경>



<그림 2.1.12c 터널 시·종점 열차속도계측 포토센서 설치 전경>



<그림 2.1.13c 터널 종점 터널 미기압파 계측 위치>



<그림 2.1.14c 터널 종점 미기압파 계측 마이크로폰 설치 전경>

○ TEST-BED 시작품 후드 구조체의 시간이력 구조 안정성 계측 시스템

- 후드 구조체의 구조 안정성 평가의 일환으로 열차의 터널진입으로 후드 구조체에 미치는 풍하중 측정을 위하여 후드 내부 벽체의 3개소[그림 2.1.15c]에 압력센서(ENDEVCO 8510B-1)을 [그림2.1.15c]에 설치하여 계측시험을 수행하였음. 압력센서들의 설치 높이는 레일상면에서 2m임.

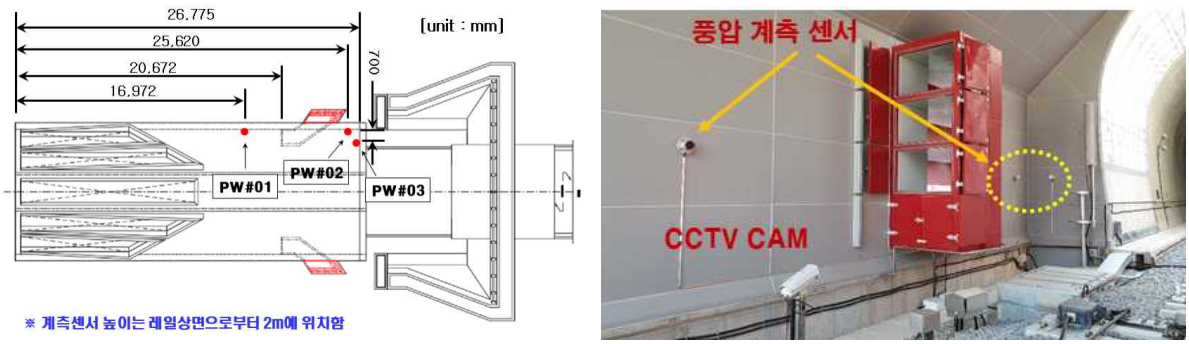
○ 터널 주변민가에 대한 소닉-붐 민감도 계측

- 터널 주변민가에 대한 미기압파 영향을 평가하기 위하여 터널 종점의 계측 데스크의 창문에 가속도계 2종(PCB 352c33, RION PV-91CH)[그림 2.1.17c]을 설치하여 측정된 터널 미기압파 저주파 진동에 대한 주파수 분석을 수행하였음. 터널 종점 갱문으로부터

계측 데스크까지 거리는 55m이며 설치된 가속도계 설치 위치는 계측 데스크에서 민감도가 클 것으로 예상하는 창문 중앙에 위치시켜 설치함. 창문에 설치된 가속도계 케이블은 계측데스크 내부의 소음/진동 전용의 데이터-로거(RION DA-21)에 연결하고 저주파 음압계와 동기화하여 시험을 수행함.

○ 데이터 취득 시스템

- 테스트-베드 주행시험 중 안정적인 데이터 확보를 위하여 본 시험에서는 터널 시점과 종점의 개활지에 각각 계측 데스크[그림 2.1.16c, 그림 2.1.17c]를 설치하여 모든 계측 센서의 케이블을 연결하고 원격으로 데이터를 취득하였음. 하나의 데이터 로거에 여러 계측 센서 케이블을 연결함으로써 시간 동기화, 데이터 취득 샘플링 조정 및 필터 기능을 일괄 적용하였음. 터널 종점의 저주파 음압계(RION NL-62) 6개소 데이터는 종점 계측 데스크의 소음/진동 전용 데이터-로거(RION DA-21) 2대를 통해 데이터를 취득하게 되며 2대는 동기화(Synchronization) 시켜서 6개 데이터를 동시에 취득할 수 있도록 시스템화하였음. 현장시험의 압력센서 및 열선유속계 데이터의 전송은 장거리 송신으로 인한 노이즈 등의 대책으로써 시그널 컨디셔너를 통해 신호를 증폭 전송하고 데이터 레코더(HIOKI MR8875)의 Cut-off frequency를 기능을 이용한 고주파 노이즈를 차단하여 신호를 취득하였음. 음압계와 가속도계의 경우 RION사의 노이즈 상쇄 XLR 연장 케이블을 이용하여 필터기능을 적용하지 않았음. 전용 데이터로거 RION DA-21의 경우 최대 4채널까지 연결할 수 있으므로 본 시험에서는 Synchronization 기능을 활용하여 두 대의 DA-21에 6개의 음압계와 2개의 가속도계 센서를 동기화하여 시험을 수행하였음.



<그림 2.1.15c 후드 내부 풍하중 계측 압력센서 설치 전경>



<그림 2.1.16c 터널 시점 계측데스크 전경>



<그림 2.1.17c 터널 종점 계측데스크 전경 및 가속도계 설치 위치>

○ 현장시험의 장거리 중앙모니터링 시스템

- 실시간으로 운영되는 현장시험의 현장 상황과 고속열차의 터널 진·출입에서 발생할 수 있는 시험 Fail 조건들을 실시간으로 감시하기 위하여 제5터널 시점과 종점에 중앙모니터링 시스템을 구축하였음[그림 2.1.18c].
- 중앙모니터링 시스템의 주요 역할은 열차의 터널 진·출입 실시간 감시, 후드 내부의 수평통풍관 도어 안정성 모니터링, 선로 주변 장애물 발생 확인, 열차의 터널 진입 전 열차의 내·외부 풍향 관측 등이 있음.
- 중앙모니터링 시스템의 구축은 시험 제5터널 시점에 4개소, 종점에 2개소에 CCTV를 설치하고 시점의 CCTV 4개소 중 2개소는 후드 외부의 선로변에 설치하여 열차의 하행 접근 및 후드 진입 모니터링을 수행하고, 나머지 2개소에서 후드 내부의 수평통풍관의 도어 및 터널 내부의 진입을 감시할 수 있도록 하였음. 5터널 종점에 설치한 2개소의 CCTV 카메라는 터널 외부의 선로 변에 설치하여, 열차의 터널 통과 및 상행 접근을 모니터링 할 수 있게 하였음.



<그림 2.1.18c 중앙 모니터링 시스템 운용 현장 전경>

<표 2.1.2c 계측데스크의 데이터로거 MR8875의 채널별 계측센서 및 데이터취득 설정조건>

터널 시점 MR8875-Data logger, DL#01									
Index	CH#01	CH#02	CH#03	CH#04	CH#05	CH#06	CH#07	CH#08	CH#09
Sensors	Marking signal switch	Photo sensor	Photo sensor	Pressure sensor	Pressure sensor	Pressure sensor	Pressure sensor	Hot-wire anemometer	Hot-wire anemometer
Sensor No.	PB#01	PH#01	PH#02	PW#01	PW#02	PW#03	PT#01	TG#01	TG#02
Sampling frequency	5kHz								
Low pass filter	5kHz	5kHz	5kHz	5kHz	5kHz	5kHz	5kHz	5kHz	5kHz
Amplifier gain value	-	-	-	50	50	50	50	1	1

터널 종점 MR8875-Data logger, DL#02						
Index	CH#01	CH#02	CH#03	CH#04	CH#05	CH#06
Sensors	Marking signal switch	Photo sensor	Photo sensor	Pressure sensor	Pressure sensor	Pressure sensor
Sensor No.	PB#02	PH#03	PH#04	PT#02	PT#03	PT#04
Sampling frequency	5kHz					
Low pass filter	5kHz	5kHz	5kHz	5kHz	5kHz	5kHz
Amplifier gain value	-	-	-	50	50	50

<표 2.1.3c 음압계 및 가속도계 데이터로거 RION DA-21 설정조건>

DA-21 Sound level meter data-logger, SDL#01				
Index	CH#01	CH#02	CH#03	CH#04
Sensors	Sound level meter	Sound level meter	Accelerometer	Accelerometer
Sensor No.	MW#A1	MW#A2	PA#01	PA#02
Sampling frequency	48,000Hz			
Cut off frequency	No filter	No filter	No filter	No filter

DA-21 Sound level meter data-logger, SDL#02				
Index	CH#01	CH#02	CH#03	CH#04
Sensors	Sound level meter	Sound level meter	Sound level meter	Sound level meter
Sensor No.	MW#B1	MW#B2	MW#B3	MW#B4
Sampling frequency	48,000Hz			
Cut off frequency	No filter	No filter	No filter	No filter

(2) TEST-BED 제5터널의 1차 현장시험

(가) 후드 구조체 PC갱문 개방시험

○ 후드 구조체의 적용 유·무에 대한 성능시험을 위하여 후드 효과가 없는 PC갱문 개방 [그림 2.1.8c 참조] 경우에 대한 시험을 선행 수행하였음. 운행 열차의 진입속도는 약 180km/h에서 200km/h로 진행하였으며, 차상에서 터널 진입시 열차속도를 확인하도록 하고 시험이 종료된 후 터널 내부 입/출구의 포토센서들의 열차속도 계측 데이터와 비교하였음. 터널 진입시간은 모니터링시스템을 통하여 계측 데스크의 진입 시점을 육안으로 확인하고 시그널 마킹버튼을 통해 데이터로거에 입력하여 데이터 테이블에 표시하도록 시스템화하였음. 총 운행 횟수는 상행과 하행에 대하여 총 20회 운행하였음. 표 2.1.4c에 모든 운행시험에 대한 시험 조건들을 정리하였음.

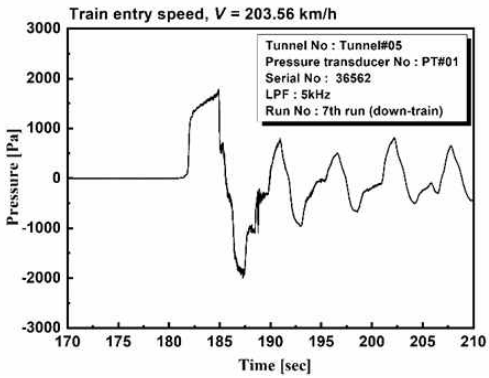
<표 2.1.4c. 1차 현장시험의 열차운행 시험별 터널 내·외부 각종 시험조건 계측데이터>

Run No.	열차 운행 방향	열차 진입 속도 (km/h)	터널내부 대기압/온도/습도			터널외부 대기압/온도/습도			터널 내부 풍속 (m/s)	터널 외부 풍속 (m/s)	비고
			대기압 (hPa)	온도 (℃)	습도 (%)	대기압 (hPa)	온도 (℃)	습도 (%)			
Run#01	하행	44.79	1022.3	5.9	48.4	1021.7	1.6	49.0	-	-	선로점검운행
Run#02	상행	133.11	1022.3	6.0	48	1022.8	2.2	54.0	0.11	3.04	
Run#03	하행	200.93	1022	6.1	45.1	1022.6	2.5	50.3	1.09	2.54	
Run#04	상행	143.80	1022.2	6.0	44.1	1022.5	3	49.5	2.26	2.58	
Run#05	하행	202.97	1021.8	5.7	43.6	1022.2	3.8	47.8	5.75	2.78	
Run#06	상행	143.28	1021.8	5.8	42.1	1022.0	4.0	45.3	1.90	1.51	
Run#07	하행	203.56	1021.5	6.0	43.6	1022.0	4.3	45.3	2.74	2.16	
Run#08	상행	142.85	1021.4	6.0	44.1	1021.7	4.2	44.4	0.65	2.60	
Run#09	하행	183.15	1020.4	6.0	42.1	1021.6	4.3	43.9	1.92	1.98	
Run#10	상행	140.18	1021.1	6.0	41.6	1021.2	4.5	42.3	2.37	2.06	
Run#11	하행	183.60	1020.9	6.2	41.1	1021.1	4.5	42.4	1.99	2.12	
Run#12	상행	138.18	1020.9	6.1	39.1	1021.2	4.2	39.7	1.60	1.17	
Run#13	하행	180.15	1021	6.2	38.1	1021.4	4.2	38	0.19	3.04	
Run#14	상행	141.72	1020.8	6.2	38.1	1021.1	4.2	37.9	0.12	1.82	
Run#15	하행	180.11	1020.9	6.3	37.1	1021.2	4.0	35.8	2.13	0.91	
Run#16	상행	138.82	1021.1	6.2	34.5	1021.4	3.9	36.2	2.56	1.45	
Run#17	하행	204.58	1021.1	6.4	36.1	1021.6	3.7	39.9	0.16	1.82	
Run#18	상행	145.08	1021.4	6.2	35.6	1021.7	3.4	37.8	1.88	3.02	
Run#19	하행	204.49	1021.2	6.3	36.1	1021.8	3.0	39.8	2.66	3.56	
Run#20	상행	140.86	1021.7	6.2	34	1021.	2.7	39.1	3.01	1.21	

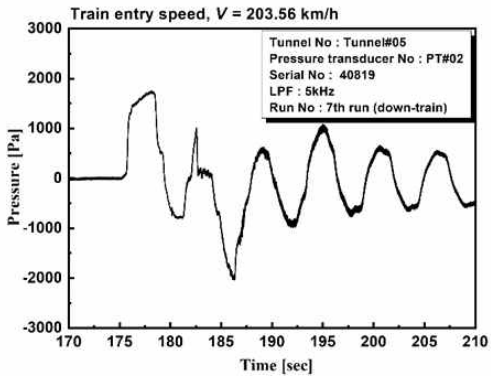
(나) PC갱문 개방에 의한 제5터널 계측시험 결과

○ 터널 내부 압력파 거동 분석결과

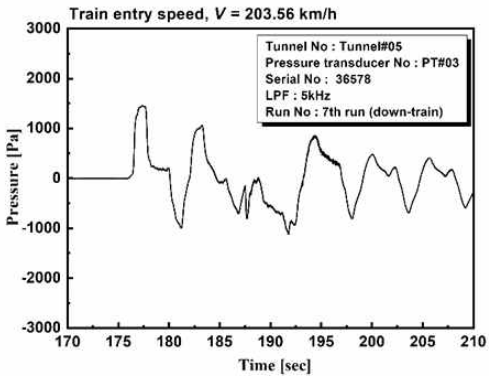
- 열차진입으로 발생하는 압축파의 전파 특성을 터널 내부의 4개소에 위치하는 압력센서의 계측데이터를 통해 분석하였음. 그림 2.1.19c의 (a) ~ (b)는 열차진입속도 203.56km/h에서 발생하는 첫 번째 압축파가 터널 시점으로부터 종점까지 전파되는 과정을 확인할 수 있음. PT#01(터널시점으로부터 200m 위치)에서 열차진입으로 인한 급격한 압력상승으로 파면이 수직으로 발달하였음. PT#02(터널 중앙위치)에서는 압축파의 단위 시간당 압축파의 최대값은 비교적 감소하였으나 터널 진입부의 압력파 형태를 유지하였음. PT#03과 PT#04(터널시점으로부터 각각 705m, 805m 위치, 터널 출구에서 각각 200m, 100m 위치)의 압축파의 형태는 진입부에서 보이던 형상이 거의 사라지고 최대 값도 대폭 감소하였으며 방출 직전 뾰족한 형상을 띄고 있음. 첫 번째 압축파 이후의 시간에서는 압축파와 팽창파의 터널 입·출구로 반복 전파 됨에 따라 터널 내부에 잔여 압력이 계속해서 남아있는 것을 확인할 수 있음.
- 표 2.1.5c와 그림 2.1.20c는 열차운행별 터널내부의 압축파 최대값을 정리한 데이터로 열차진입속도 증감에 따라 압축파의 크기도 상승하였으며 하행기준으로 압축파 평균 최대값은 열차진입속도 180±5km/h에서 1,443Pa, 200±5km/h에서 1,780Pa이었음.



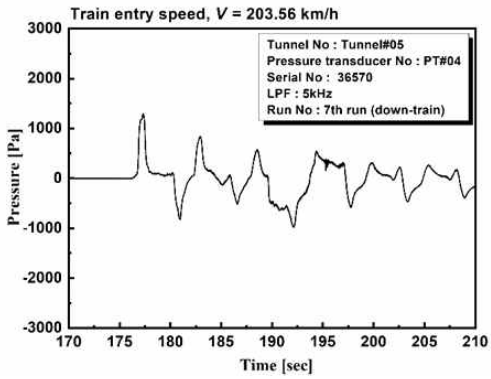
(a) PT#01 위치의 압력변동 데이터



(b) PT#02 위치의 압력변동 데이터



(c) PT#03 위치의 압력변동 데이터

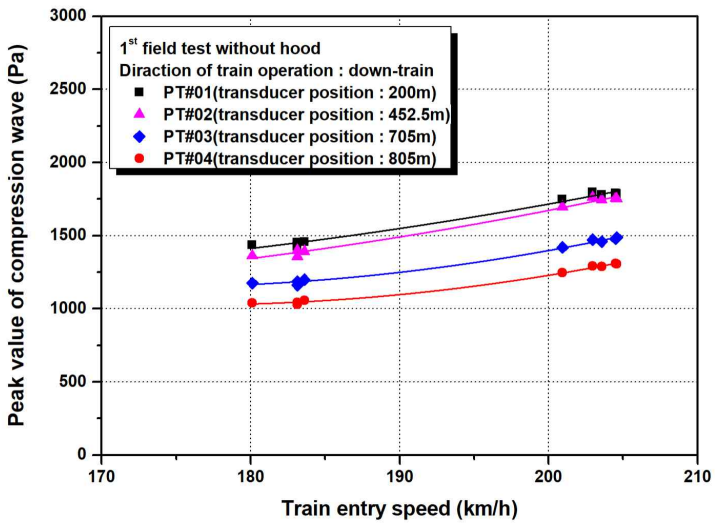


(d) PT#04 위치의 압력변동 데이터

<그림 2.1.19c. 터널내부 압력센서 위치별 압력파 거동>

<표 2.1.5c. 1차 현장시험의 압력센서 위치별 터널 내부압력 최대값>

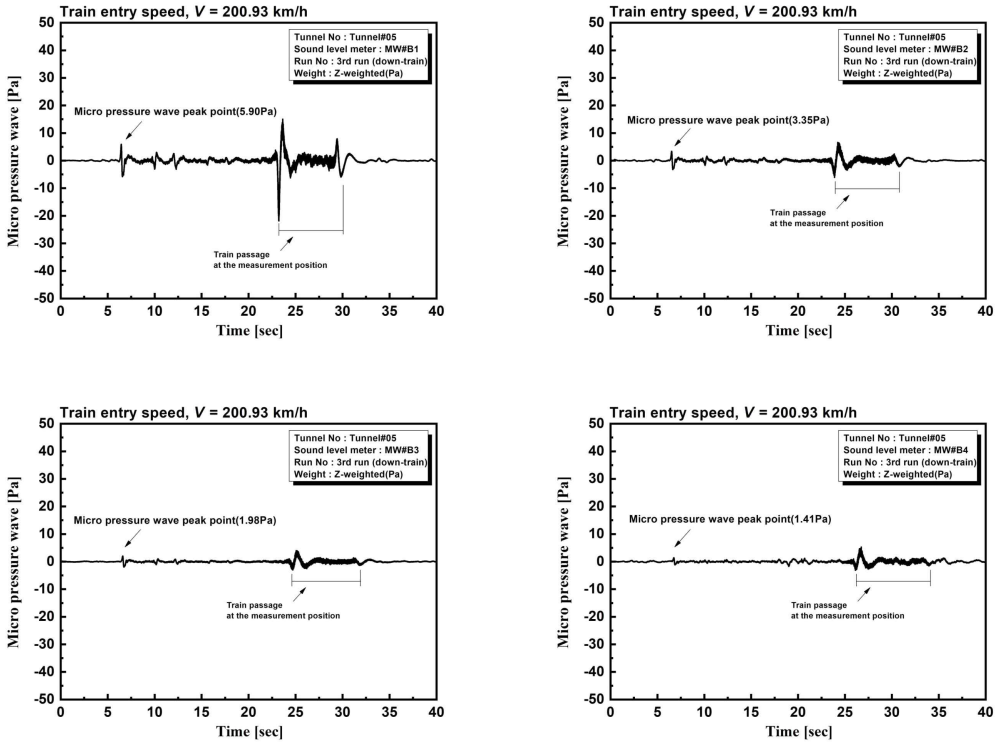
Run No.	열차운행 방향	Train entry speed (km/h)	PT#01(Pa)	PT#02(Pa)	PT#03(Pa)	PT#04(Pa)
Run#01	하행	-	-	-	-	-
Run#02	상행	133.11	333.2	482.97	469.56	442.23
Run#03	하행	200.93	1748.47	1696.94	1419.44	1247.46
Run#04	상행	143.80	361.54	503.83	507.41	472.16
Run#05	하행	202.97	1796.49	1761.17	1471.54	1292.29
Run#06	상행	143.28	368.94	526.8	502.19	455.93
Run#07	하행	203.56	1778.63	1745.81	1460.48	1290.19
Run#08	상행	142.85	340.36	426.42	487.48	446.30
Run#09	하행	183.15	1453.01	1398.01	1186.68	1044.91
Run#10	상행	140.18	340.91	444.99	495.24	467.37
Run#11	하행	183.6	1457.63	1391.18	1199.15	1056.85
Run#12	상행	138.18	290.51	381.30	425.05	388.45
Run#13	하행	183.15	1424.08	1356.69	1162.54	1029.75
Run#14	상행	141.72	365.51	466.55	517.8	489.78
Run#15	하행	180.11	1436.05	1361.31	1175.88	1040.34
Run#16	상행	138.82	315.19	411.34	465.66	455.93
Run#17	하행	204.58	1787.94	1751.42	1488.2	1305.58
Run#18	상행	145.08	368.09	458.82	518.11	484.16
Run#19	하행	204.49	1789.66	1755.41	1478.16	1308.9
Run#20	상행	140.86	329.66	427.77	483.55	445.72



<그림 2.1.20c 터널내부 압력센서의 위치별, 열차진입속도별 압력파 최대값>

○ 터널 미기압파 계측 데이터 분석결과

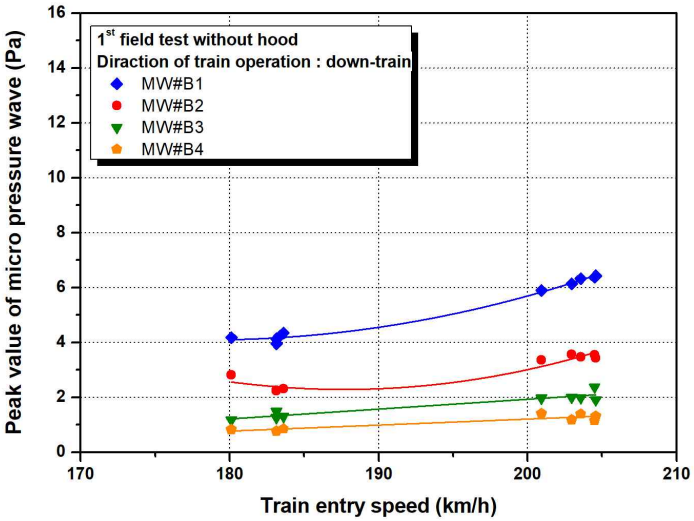
- 터널 미기압파의 계측은 B1~B4위치에서 각각 계측을 수행하였으며 그림 2.1.21c와 같이 뚜렷한 미기압파 방출 현상이 나타났음. 터널 미기압파도 음속으로 방사되므로 마이크로폰 위치에서의 열차통과 약 16초 이전에 방출하였음. 터널 미기압파는 계측거리 증가에 따라 점차 감소하는 경향을 보였으며 터널출구로부터 100m 위치(B4)까지 방사되었음. 그림 2.1.22c의 열차진입속도별, 계측위치별 터널 미기압파 피크 값은 열차진입속도 증가에 따라 증가하였으며 열차진입속도 200±5km/h의 B1기준으로 터널 미기압파 피크 값 크기는 평균 6.23Pa 이었음. 각 위치별 터널 미기압파 데이터를 표 2.1.6c에 정리하였음.



<그림 2.1.21c 터널출구 B1 ~ B4 위치의 미기압파 계측결과>

<표 2.1.6c. 1차 현장시험의 마이크로폰 설치 위치별 터널 미기압파 계측데이터>

Run No.	열차운행 방향	Train entry speed (km/h)	MW#B1 (Pa)	MW#B2 (Pa)	MW#B3 (Pa)	MW#B4 (Pa)
Run#03	하행	200.93	5.9	3.35	1.98	1.41
Run#05	하행	202.97	6.14	3.56	2	1.18
Run#07	하행	203.56	6.33	3.48	1.98	1.39
Run#09	하행	183.15	3.95	2.25	1.26	1.31
Run#11	하행	183.6	4.34	2.31	1.3	0.85
Run#13	하행	183.15	4.13	2.24	1.49	0.76
Run#15	하행	180.11	4.18	2.82	1.17	0.82
Run#17	하행	204.58	6.43	3.44	1.91	1.31
Run#19	하행	204.49	6.37	3.55	2.37	1.15



<그림 2.1.22c 터널출구 위치별, 열차진입속도별 미기압파 최대값(피크 값)>

(3) TEST-BED 제5터널의 2차 현장시험

(가) 후드 구조체 PC갱문 폐쇄시험

○ TEST-BED 2차 현장시험에서는 “후드 구조체”의 성능검증을 위하여 PC갱문 폐쇄[그림2.1.8c 참조] 경우에 대한 시험을 수행하였음. 주행열차의 진입속도는 각각 180km/h와 200km/h로 진행하였으며, 현장시험 절차는 1차 현장시험과 동일하였지만 2차 현장시험에서는 후드적용에 대한 성능평가를 위하여 하행운행에 대한 계측시험만 수행함. 표 2.1.7c에 2차 현장시험에 대한 시험조건을 상세하게 정리하였음.

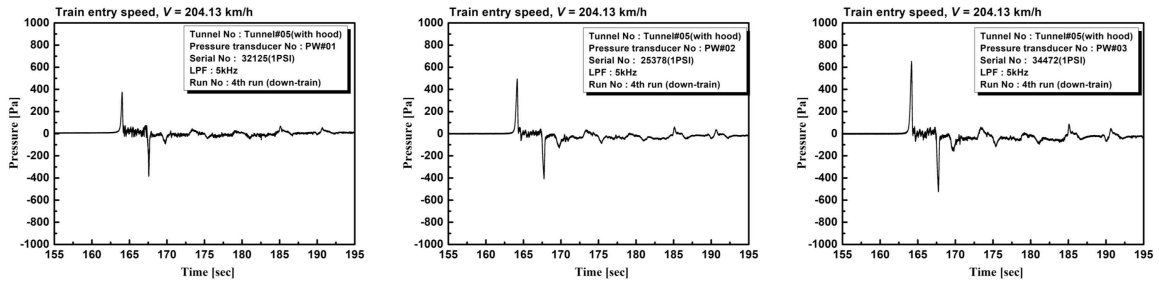
<표 2.1.7c. 2차 현장시험의 열차운행 시험별 터널 내·외부 각종 시험조건 계측데이터>

Run No.	열차 운행 방향	열차 진입 속도 (km/h)	터널내부 대기압/온도/습도			터널외부 대기압/온도/습도			터널외부풍속 (m/s)	비고
			대기압 (hPa)	온도 (℃)	습도 (%)	대기압 (hPa)	온도 (℃)	습도 (%)		
Run#01	하행	185.27	1007.9	14.7	70.3	1007.4	24.3	37.3	-	선로점검운행
Run#02	하행	203.20	1007.9	15.6	67.2	1007.4	24.7	35.5	0.000	
Run#03	하행	183.87	1007.7	15.4	68.6	1007.2	26.5	33.0	0.000	
Run#04	하행	204.13	1006.9	15.5	68.7	1006.3	27.0	35.2	0.224	
Run#05	하행	184.17	1006.6	16.0	70.1	1006.0	25.3	41.0	0.236	
Run#06	하행	201.74	1006.1	16.0	69.2	1005.7	27.4	38.2	0.345	
Run#07	하행	180.58	1005.9	16.4	68.8	1005.2	26.8	41.5	0.238	
Run#08	하행	199.06	1005.5	16.5	67.9	1005.1	25.1	41.6	0.499	
Run#09	하행	180.29	1005.4	16.9	66.2	1004.9	25.5	42.1	1.114	
Run#10	하행	204.68	1005.1	17.2	65.1	1004.6	25.0	43.4	0.899	
Run#11	하행	183.60	1004.6	17.2	66.7	1004.4	25.3	41.3	0.378	
Run#12	하행	204.36	1004.9	17.2	66.1	1004.2	26.9	39.4	0.000	

(나) PC갱문 폐쇄에 의한 제5터널 후드 성능 시험결과

○ 후드 구조체 풍하중 영향

- 후드 구조체 안전성 검토의 목적으로 열차의 후드 통과로 발생하는 압축파 및 열차풍에 의한 풍하중 검토를 수행하였음. 그림 2.1.23c의 (a), (b), (c)는 각각 후드 내부 벽체에 설치한 압력센서의 위치별 압력변동량 데이터로 슬릿과 수평통풍관 사이 위치에서의 (a)의 압력상승은 비교적 낮았으며 터널 옆 벽면 (c)위치에서는 높은 풍하중 경향을 보였음. 풍하중 데이터의 경향은 열차의 전두부와 후미부 통과에 의하여 압축과 팽창으로 정압과 부압으로 극명하게 나뉨. 후드 구조체의 가해지는 정압과 부압의 최대, 최소값은 열차진입속도 200±5km/h, PW#03위치에서 각각 평균 647Pa과 -517Pa이었음[표 2.1.8c].



(a) PW#01 (b) PW#02 (c) PW#03

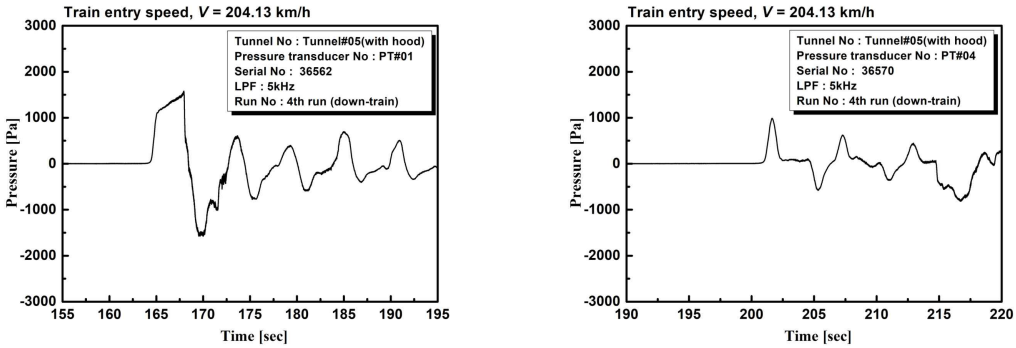
<그림 2.1.23c. 후드내부 위치별 열차 풍하중>

<표 2.1.8c. 2차 현장시험의 열차 운행별 후드내부 풍하중 데이터>

Run No.	열차운행 방향	Train entry speed (km/h)	PW#01(Pa)		PW#02(Pa)		PW#03(Pa)	
			max	min	max	min	max	min
Run#01	하행	185.27	296.902	-257.796	411.2575	-328.879	533.262	-439.551
Run#02	하행	203.20	356.9003	-321.445	490.9053	-391.234	648.59	-501.29
Run#03	하행	183.87	306.2394	-262.163	426.0085	-347.405	553.1805	-450.21
Run#04	하행	204.13	375.6498	-386.164	495.9026	-409.76	654.3089	-525.44
Run#05	하행	184.17	271.5311	-321.476	423.0652	-321.948	556.1032	-441.954
Run#06	하행	201.74	357.735	-297.251	488.3923	-408.377	649.6013	-509.525
Run#07	하행	180.58	299.4622	-247.449	403.2938	-320.777	527.7224	-429.09
Run#08	하행	199.06	345.3081	-328.676	467.7488	-383.408	621.0782	-498.581
Run#09	하행	180.29	269.7059	-304.316	381.6004	-304.316	503.5016	-390.377
Run#10	하행	204.68	344.0809	-302.807	488.0308	-418.779	640.1647	-554.873
Run#11	하행	183.60	314.7857	-253.928	426.1348	-332.935	561.7921	-437.687
Run#12	하행	204.36	369.1903	-306.352	505.358	-387.395	668.5028	-511.246

○ 터널내부 압력파 거동 분석결과

- 2차 현장시험의 후드 구조체 성능시험에서는 후드성능의 평가목적으로 압력센서의 계측센서를 PT#01(터널시점으로부터 200m), PT#04(터널시점으로부터 805m)에 각각 위치시켜 터널 입구부와 출구부에서 압축파의 거동 및 경향 변화를 1차 현장시험과 비교하였음. 그림 2.1.24c와 같이 PT#01의 압축파의 파면의 기울기는 1차 성능시험 대비 완화되는 경향을 보였으며 PT#04에서도 뾰족했던 형상이 완화되어 시간 축으로 넓어지며 단위시간당 압력상승 크기가 대폭 감소하는 것을 뚜렷하게 관찰할 수 있음(압력구배 감소). 그림 2.1.25c에서 열차 진입속도별, 위치별 압축파 최대값의 변화 경향을 나타내었으며, 압축파 평균 최대값은 열차 진입속도 180±5km/h에서 1,295Pa, 200±5km/h에서 1,541.08Pa이었음[표 2.1.9c].

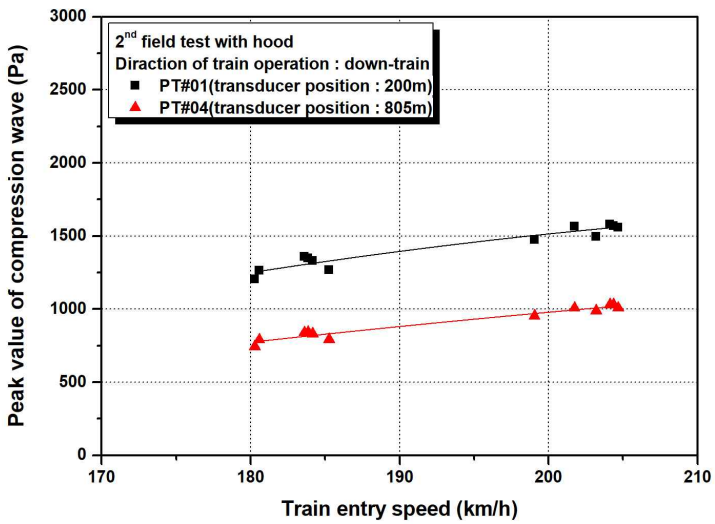


(a) PT#01 (b) PT#04

<그림 2.1.24c. 터널 입·출구부 압력파 거동>

<표 2.1.9c. 2차 현장시험의 압력센서 위치별 터널 내부압력 최대값>

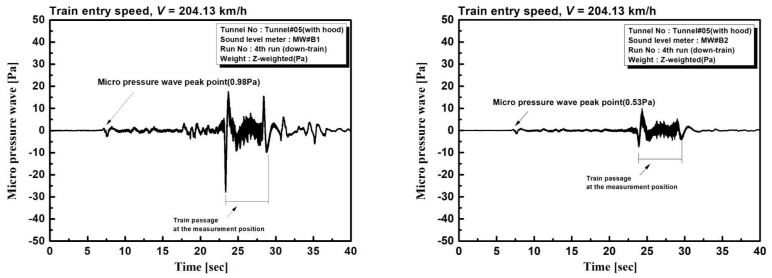
Run No.	열차운행방향	Train entry speed	PT#01(Pa)	PT#02(Pa)
Run#01	하행	185.27	1267.82	791.83
Run#02	하행	203.20	1497.15	989.16
Run#03	하행	183.87	1347.17	843.13
Run#04	하행	204.13	1580.83	1030.61
Run#05	하행	184.17	1329.83	830.79
Run#06	하행	201.74	1565.40	1007.07
Run#07	하행	180.58	1265.55	789.66
Run#08	하행	199.06	1473.13	952.98
Run#09	하행	180.29	1203.94	742.85
Run#10	하행	204.68	1559.52	1007.58
Run#11	하행	183.60	1360.17	838.95
Run#12	하행	204.36	1570.45	1031.45



<그림 2.1.25c. 터널 입·출구부의 열차진입속도별 압력파 최대값 분포>

○ 터널 미기압파 계측 데이터 분석결과

- 2차 현장시험은 후드 적용에 의한 터널 미기압파 저감 성능 평가시험임. 후드 적용에 의한 터널 미기압파 피크 값 감소로 터널 출구에서 50m이상의 거리에서는 계측에 어려움이 있으므로 비교적 근접한 거리인B1, B2위치에서 각각 미기압파를 계측하여 비교분석하였음.
- 그림 2.1.26c에서는 1차 현장시험에서 보이던 펄스 피크 형상의 터널 미기압파 패턴이 거의 사라졌음을 확인할 수 있음. 표 2.1.10c에 후드 적용에 의한 터널 미기압파 최대값(피크 값)을 정리하였으며 그림 2.1.27c와 같이 계측거리 증가에 따라 열차진입속도별로 터널 미기압파의 크기는 감소하는 경향은 1차 현장시험과 동일하였음. 최대값의 크기는 대폭 감소한 것으로 보이며 200±5km/h의 B1기준으로 터널 미기압파 최대값 크기는 평균 1Pa이었음.

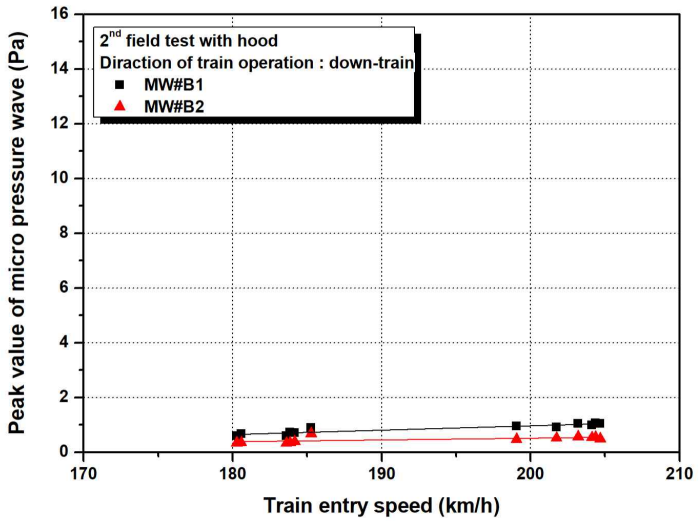


(a) MW#B1 (b) MW#B2

<그림 2.1.26c. 후드설치조건의 터널출구 미기압파 계측결과(B1, B2)>

<표 2.1.10c. 2차 후드성능시험의 마이크로폰 설치 위치별 터널 미기압파 계측데이터>

Run No.	열차운행방향	Train entry speed (km/h)	MW#B1 (Pa)	MW#B1 (Pa)
Run#01	하행	185.27	0.89	0.67
Run#02	하행	203.20	1.04	0.56
Run#03	하행	183.87	0.72	0.35
Run#04	하행	204.13	0.98	0.53
Run#05	하행	184.17	0.7	0.38
Run#06	하행	201.74	0.92	0.51
Run#07	하행	180.58	0.66	0.35
Run#08	하행	199.06	0.95	0.47
Run#09	하행	180.29	0.59	0.34
Run#10	하행	204.68	1.05	0.49
Run#11	하행	183.60	0.59	0.33
Run#12	하행	204.36	1.06	0.55



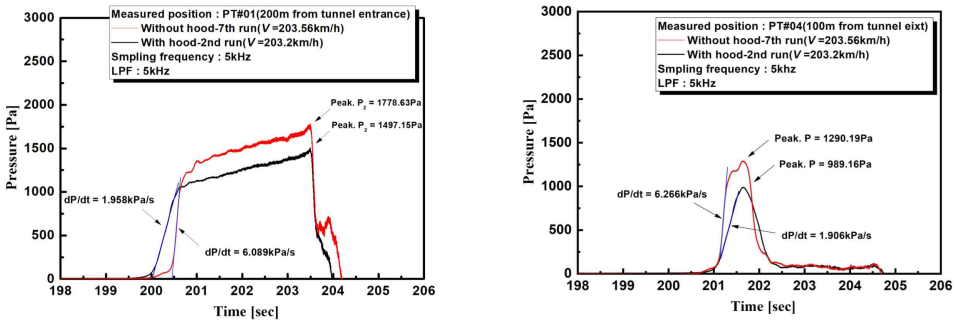
<그림 2.1.27c. 후드 설치조건에서의 열차진입속도별 터널 미기압파 최대값 분포>

(4) 제5터널의 후드 구조체 성능시험 주요 분석결과

(가) TEST-BED 터널에서 후드 구조체의 공기역학적 특성

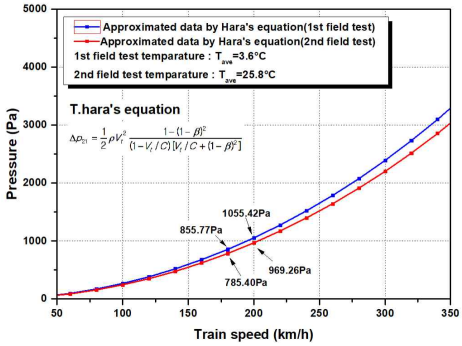
○ 1차 2차 현장시험 압력구배 분석 결과

- 그림 2.1.28c는 1차와 2차 현장시험의 터널 시점부 압력센서(PT#01)와 종점부 압력센서(PT#04)에서 열차진입속도 200km/h의 첫 번째 압축파 데이터를 비교 분석한 것임. 그림 2.1.28c의 (a)는 PT#01 위치 압력센서 계측데이터를 비교한 것으로 후드가 없는 조건(PC갱문 개방)의 1차 현장시험에서 첫 번째 압축파의 파면 압력구배는 6.089kPa/s이었으며 후드를 적용한 조건(PC갱문 폐쇄)의 2차 현장시험에서의 압력구배는 1.958kPa/s로 감소하였으며 1차 현장시험 대비 2차 현장시험의 압력구배 저감율은 67.8%였음. 출구부 압력센서 PT#04위치의 압력구배[그림 2.1.28c(b)]도 동일한 경향을 보였으며 1, 2차 현장시험 데이터의 압력구배가 6.266kPa/s에서 1.906kPa으로 저감되었고 저감율은 69.6%였음. 2차 시험의 압축파의 최대값은 1차 시험에 대비하여 감소하는 경향을 보였는데 이것은 후드 적용으로 첫 번째 압축파의 최대 값은 감소하는 경향을 가짐. 1차와 2차의 현장시험 사이에 계절 변화에 의해 온도가 약 20℃ 차이가 발생하였으며 이 온도 저감은 압축파의 최대값을 감소시킴. 그림 2.1.29c는 비점성 압축파 예측식인 Hara 식(T.Hara, 1960)을 적용하여 1차와 2차 현장시험에 온도조건을 적용하여 이론적으로 분석하였을 때 열차진입속도 200km/h에서 온도 감소에 의한 터널 진입 압축파의 크기는 약 86Pa 감소하였음. 따라서 그림 2.1.29c (a)에서 후드 적용으로 281.5Pa의 진입 압축파의 크기 감소량에서 온도영향 86Pa을 빼면 약 195.5Pa의 진입 압축파의 크기 감소라고 판단할 수 있음.



(a) PT#01 위치의 압축파 비교 (b) PT#04 위치의 압축파 비교

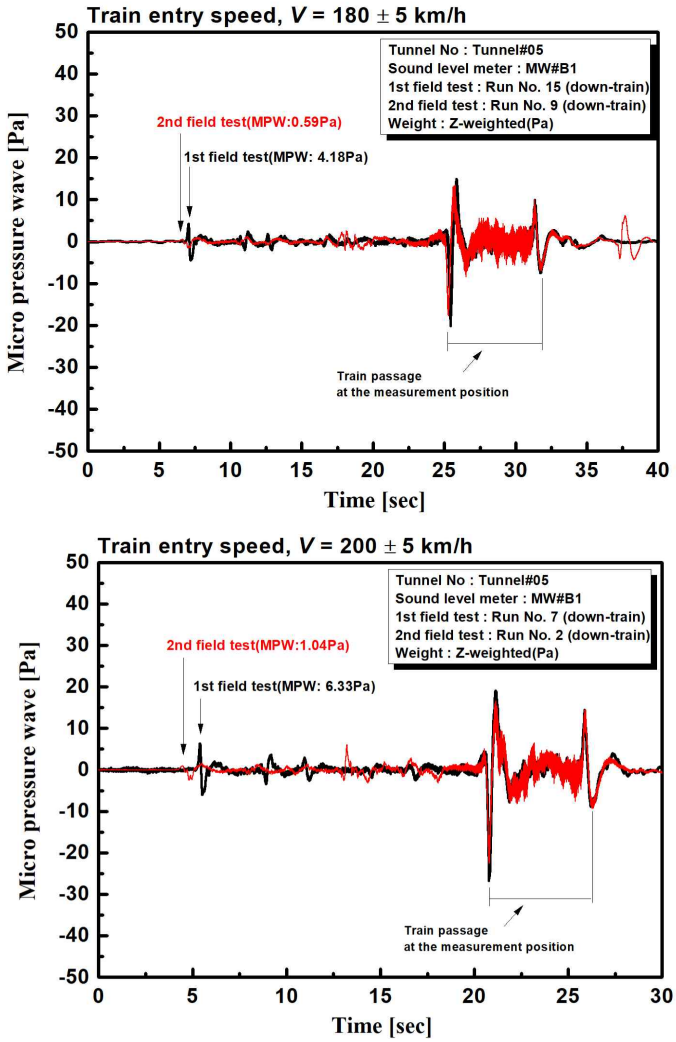
<그림 2.1.28c 터널 입·출구부의 첫 번째 압력파의 압력구배 비교>



<그림 2.1.29c 터널 입·출구부의 첫 번째 압력파의 압력구배 비교>

○ 터널 미기압파 저감율 비교분석 결과

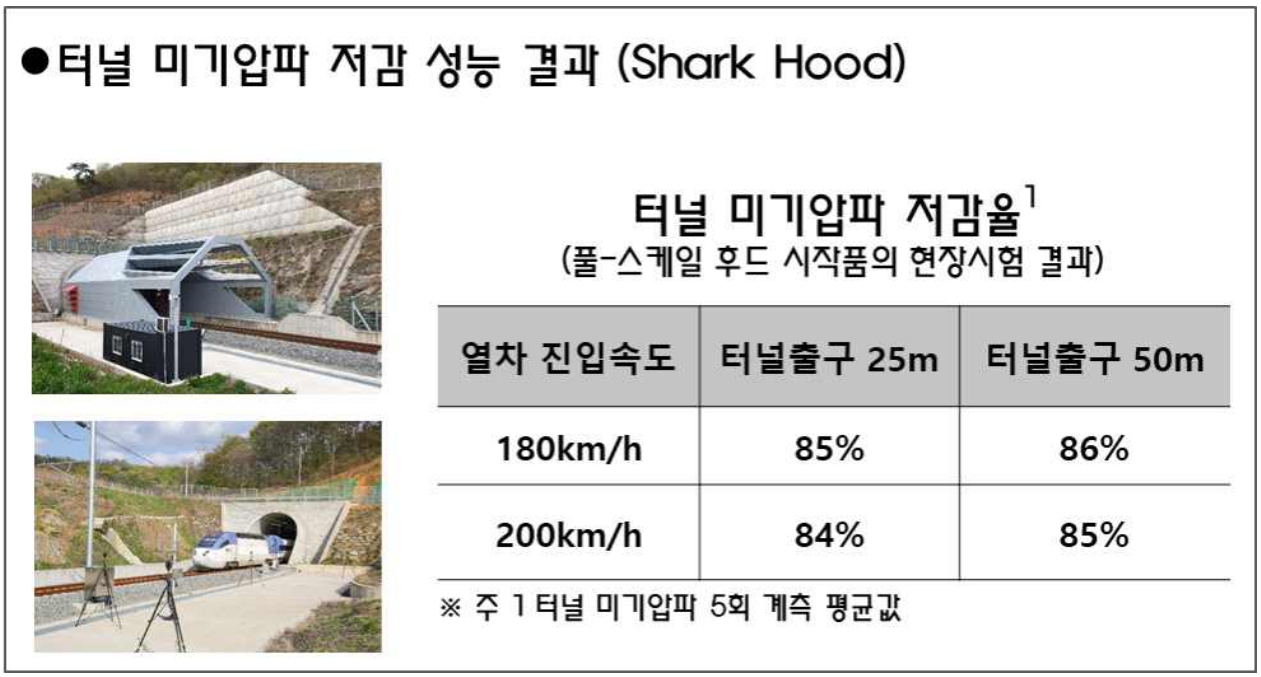
- 그림 2.1.30c는 1차와 2차 현장시험의 터널 출구 외부 MW#B1 위치(터널 종점 갱문으로부터 25m)에서 열차진입속도 180±5km/h와 200±5km/h 조건의 터널 미기압파 데이터를 비교한 것임. 2차 현장시험의 터널 미기압파 계측 위치는 1차 현장시험에 대비하여 조금 더 앞선 시간위치(그림 2.1.30c의 x축)에서 계측되는데 이것은 후드 설치로 인하여 압축파가 먼저 생성되는 것을 의미함. 후드 적용에 의하여 미기압파 피크 값 크기는 급격히 저감되어 터널 미기압파 계측위치 B1을 기준으로 1Pa 내외로 저감되었음. 표 2.1.11c는 열차진입속도별 터널 미기압파 크기를 분류한 것으로 정확한 비교 데이터 산출을 위하여 1차와 2차의 현장시험에서 열차진입속도 오차가 적은 데이터들을 대조하여 저감율을 평가하였음. 최종 터널 미기압파 저감율은 열차진입속도 180±5km/h와 200±5km/h에서 B1 위치 기준으로 각각 84.8%와 84.0%였으며 B2 기준으로 85.9%와 84.8%로 산출되었음.



<그림 2.1.30c 진입속도별 1차, 2차 현장시험의 터널 미기압파 데이터 비교분석>

<표 2.1.11c 1차, 2차 현장시험에 의한 터널 미기압파 저감율>

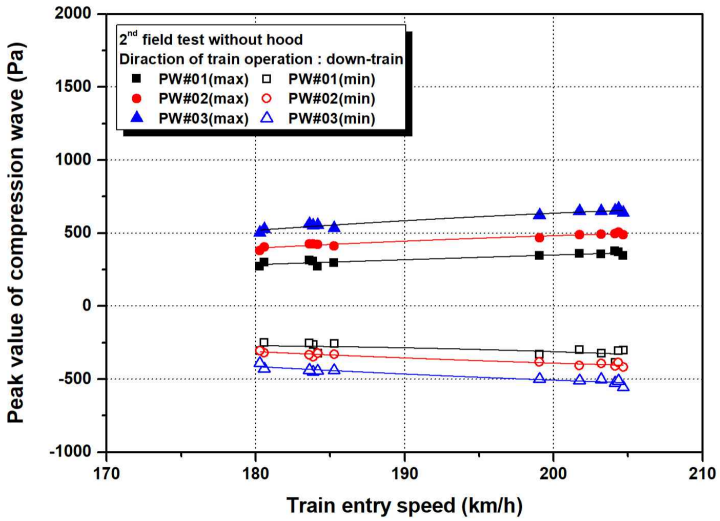
후드 적용 조건				후드 미적용 조건				Reduction ratio	
Run No.	V(km/h)	MW#B1 (Pa)	MW#B2 (Pa)	Run No.	V(km/h)	MW#B1 (Pa)	MW#B2 (Pa)	MW#B1 (Pa)	MW#B2 (Pa)
3rd run	183.87	0.72	0.35	9th run	183.15	3.95	2.25	83.4	84.9
5th run	184.17	0.7	0.38	9th run	183.15	3.95	2.25	83.9	83.6
7th run	180.58	0.66	0.35	15th run	180.11	4.18	2.82	84.2	87.6
9th run	180.29	0.59	0.34	15th run	180.11	4.18	2.82	85.9	87.9
11th run	183.60	0.59	0.33	9th run	183.15	3.95	2.25	86.4	87.9
average								**84.8**	**85.9**
2nd run	203.20	1.04	0.56	7th run	203.56	6.33	3.48	83.57	83.91
4th run	204.13	0.98	0.53	17th run	204.58	6.43	3.44	84.76	84.60
6th run	201.74	0.92	0.51	3th run	200.93	5.90	3.35	84.40	84.78
8th run	199.06	0.95	0.47	3rd run	200.93	5.90	3.35	83.89	85.98
10th run	204.68	1.05	0.49	17th run	204.58	6.43	3.44	83.67	85.76
12th run	204.36	1.06	0.55	17th run	204.58	6.43	3.44	83.52	84.02
average								**84.0**	**84.8**



○ “후드 구조체”의 터널 미기압파 성능검증 현장시험에서 터널 진입속도 180km/h, 200km/h에서 각각 85%와 84%의 터널 미기압파 저감율이 도출되었다(터널 출구 25m에서 계측). 이에 앞서서 1/64.2 축척모델 주행시험 장치에서 터널 진입속도 180km/h~275km/h 범위까지 고성능 후드들에 대하여 주행시험을 수행하였고(정성적 성과점검보고서 A-1-2 참조요망), 180km/h, 200km/h에서 고성능이 나오면, 250km/h과 275km/h에서도 고성능이 나오는 상관관계가 존재함을 정성적 성과점검보고서 A-1-2와 앞 절의 그림 2.1.11b에서도 알 수 있음.

(나) TEST-BED 후드 구조체의 시간이력 구조안정성 계측 평가 결과

○ 후드 구조체의 구조 안정성 평가를 위하여 후드 내부 벽체에 압력센서를 설치하여 풍하중을 계측하였으며 정압과 부압 평가 결과, 후드에서 터널 내부 진입 전 뒷벽(PW#03)에서의 풍하중이 가장 높게 나타났음(그림 2.1.31c). 표 2.1.12c에 열차진입속도 200±5km/h에서 압력데이터를 정리하였으며 평균압력은 PW#01, PW#02, PW#03위치에서 각각 358.14Pa, 489.39Pa, 647.04Pa이었음. 이 수치들은 "후드 구조체" 구조해석 시에 풍하중 기준을 정하는데 활용된다.



<그림 2.1.31c 열차진입속도별, 압력센서 설치 위치별 후드 내부 풍하중 데이터>

<표 2.1.12c 열차진입속도별, 후드내부 압력센서 위치별 풍하중 평균데이터>

Train entry speed (km/h)	PW#01(Pa)		PW#02(Pa)		PW#03(Pa)	
	max	min	max	min	max	min
200±5km/h data	356.90	-321.45	490.91	-391.23	648.59	-501.29
	375.65	-386.16	495.90	-409.76	654.31	-525.44
	357.74	-297.25	488.39	-408.38	649.60	-509.53
	345.31	-328.68	467.75	-383.41	621.08	-498.58
	344.08	-302.81	488.03	-418.78	640.16	-554.87
	369.19	-306.35	505.36	-387.40	668.50	-511.25
average	358.14	-323.78	489.39	-399.83	647.04	-516.83

(다) 터널 주변민가에 대한 미기압파 저주파-진동의 민감도 계측평가 결과

○ 본 실험에서는 터널 출구에 위치한 컨테이너 건물 유리창에 제작사 사양 기준으로 진동 측정범위 1Hz-15kHz의 가속계(RION PV-91CH)를 설치하여 미기압파 저감 대책으로 개발된 후드 설치 전후의 진동의 변화를 계측하였음.

○ 유리창의 진동은 유리창에 입사하여 유리창에 가진력의 역할을 하는 미기압파의 특성($F(w)$)과 유리창 시스템의 주파수 응답특성($H(w)$)이 작용하여 응답인 가속도($A(w)$)를 결정함. 이때 $H(w)$를 INERTANCE 또는 ACCELERANCE라고 함. 미기압파의 가진력이 강하면 가속도 응답도 미기압파의 주파수 대역에서 강하게 발생하지만 미기압파가 작을 경우 전체적인 주파수 응답특성에 따라서 유리창 시스템의 고유모드 주파수에서 피크가 발생할 것임. 이때 작용하는 미기압파의 주파수뿐만이 아니라 유리창 표면에 직접적으로 작용하는 미기압파의 크기의 분포 특성도 가진되는 모드의 진동의 크기에 영향을 주어서 특정 모드의 진동이 크게 발생 할 수 있음.

$$\frac{A(w)}{F(w)} = H(w) \tag{1}$$

○ 그림 2.1.32c는 후드를 적용하기 전에 현장시험 시 계측데스크 컨테이너 전면 유리창의 중심에 부착한 가속도계 신호와 FFT분석 결과를 보여주고 있음. 그림 2.1.33c는 동일한 시험에서 B2위치 마이크로폰에서 측정한 데이터와 그 신호의 FFT분석 결과를 보여줌.

○ 그림 2.1.32c의 (a)와 (b)는 고속열차가 터널 출구를 나와 컨테이너 건물을 통과 할 때 측정된 전체 가속도 신호와 그 신호 전체의 FFT 분석결과를 보여줌. 그림 2.1.32c의 (c)와 (d)는 컨테이너의 유리창과 인접한 위치(B2 위치)의 마이크로폰 데이터와 비교하여 추정한 미기압파가 유리창에 도달한 시간대에 유리창에 발생한 진동가속도 신호와 그 가속도의 FFT분석 결과를 보여준다. 그림 2.1.32c의 (a)와 그림 2.1.33c의 (a)를 비교하면 미기압파가 계측되는 시간에 가속도계 신호가 검출되는 것을 확인할 수 있음.

○ 주파수 분석은 터널 미기압파 피크 값을 중심으로 1초(5.8642s ~ 6.8642s)동안의 데이터를 분석하였으며 주파수 분석 결과 10Hz이하의 성분이 대부분으로 파악됨(그림 2.1.33c (d)). 특히 가장 큰 성분은 1.25Hz이하의 저주파 성분과 7Hz성분임(그림 2.1.32c (d)). 유리창의 진동에 영향을 미치는 외부 영향인 미기압파 펄스 신호는 대부분 1.25Hz이하로 미기압파 펄스의 초저주파 영역 신호가 주요 성분으로서 유리창에도 이 저주파대역 음압이 가진을 하고 있는 것을 알 수 있으며. 7Hz성분은 유리창에서 측정된 고유진동수중의 하나와 일치하여 고유모드가 가진되고 있음을 알 수 있음.

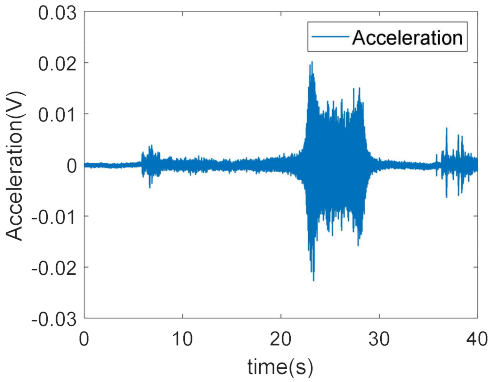
○ 그림 2.1.34c는 후드를 적용한 후 현장시험 시 계측데스크 컨테이너 전면 유리창의 중심에 부착한 가속도계 신호와 FFT분석 결과를 보여주고 있음. 그림 2.1.35c는 동일한 시험에서 B2위치 마이크로폰에서 측정한 데이터와 그 신호의 FFT분석 결과를 보여준다.

○ 그림 2.1.34c의 (a)와 (b)는 열차가 터널에 진입할 때와 터널 출구를 나와 컨테이너 건물을 통과 할 때 측정된 전체 가속도 신호와 그 신호 전체의 FFT 분석결과를 보여준다. 그림 2.1.34c의 (c)와 (d)는 컨테이너의 유리창과 인접한 위치(B2 위치)의 마이크로폰 데

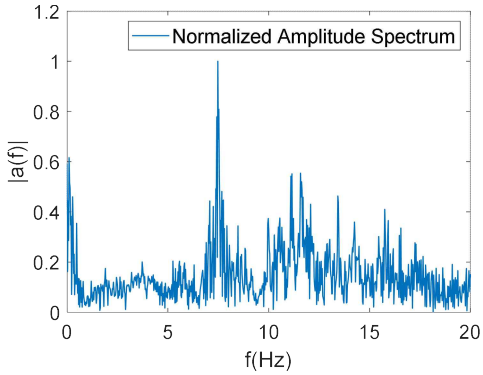
이터와 비교하여 추정한 미기압파가 유리창에 도달한 시간대에 유리창에 발생한 진동가속도 신호와 그 가속도의 FFT분석 결과를 보여준다. 미기압파가 계측되는 시간에 가속도계 신호가 검출되는 것을 확인할 수 있음.

○ 주파수 분석에서 미기압파는 터널 미기압파 피크값을 중심으로 1초(6.8411s ~ 7.8411s)동안의 데이터를 분석하였으며 가속도는 미기압파 피크 값을 시작으로 1초(7.2125s ~ 8.2125s)동안 주파수분석을 수행하였다. 주파수 분석 결과 미기압파는 10Hz이하의 성분이 대부분으로 파악되었고 특히 가장 큰 성분은 1Hz-2Hz대의 저주파 성분임을 알 수 있음(그림 2.1.33c (d)). 가속도 신호의 주파수 분석 결과는 1.25Hz이하의 저주파 대역과 8Hz와 11Hz에서 진동신호의 피크값이 발견되었다(그림 2.1.34c (d)). 유리창의 진동에 영향을 미치는 외부 영향인 미기압파 펄스의 초저주파 영역 신호가 유리창에 가진을 하고 있는 것을 알 수 있으며 8Hz와 11Hz성분은 유리창에서 측정된 고유진동수와 유사하여 고유모드가 가진되고 있음을 알 수 있음.

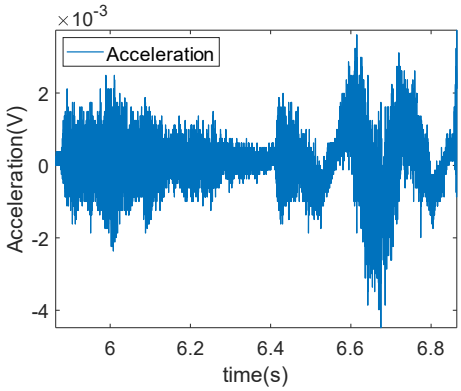
○ 결과적으로 고속열차의 터널 진입 시 발생하는 터널 미기압파는 건물에 직접 영향을 미치는 것으로 나타났으며 터널 입구에 설치하는 후드 구조체가 터널 미기압파를 억제하여 결과적으로 터널주변 건물 유리창의 진동도 줄여주는 것으로 명확하게 나타났음.



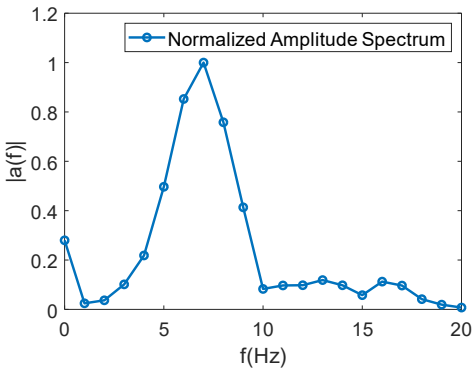
(a) 전체 가속도 데이터



(b) 전체 가속도 데이터의 FFT결과

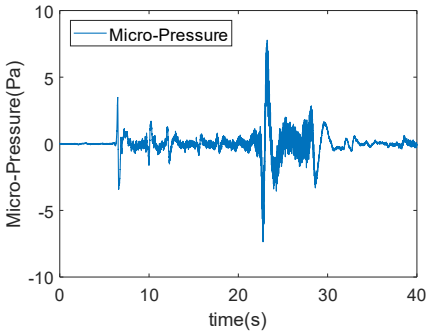


(c) 미기압파로 인한 가속도

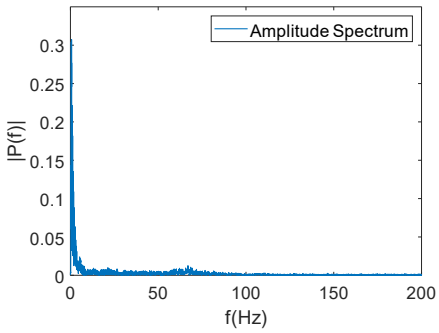


(d) 미기압파로 인한 가속도의 FFT결과

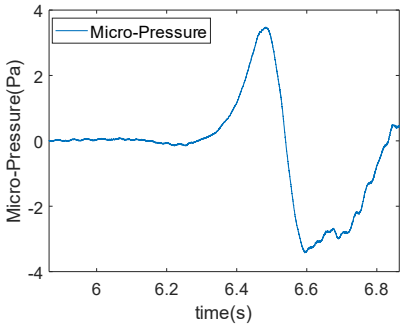
<그림 2.1.32c 1차 현장시험(PC 갱문 개방)의 컨테이너 유리창 가속도 데이터 FFT 분석>

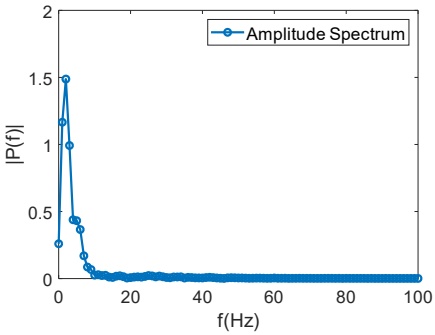


(a) 전체 음압데이터



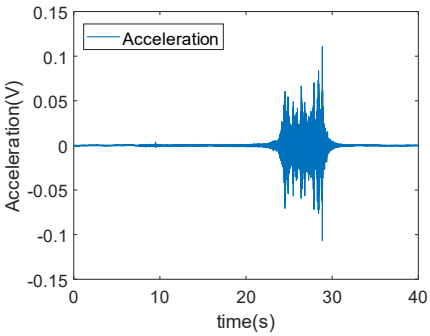
(b) 전체 음압데이터의 FFT 결과



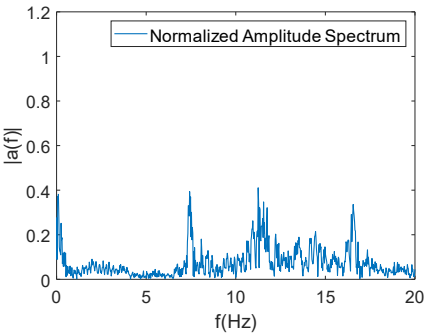


(c) 첫 번째 미기압파 펄스 신호 (d) 첫 번째 미기압파의 FFT 결과

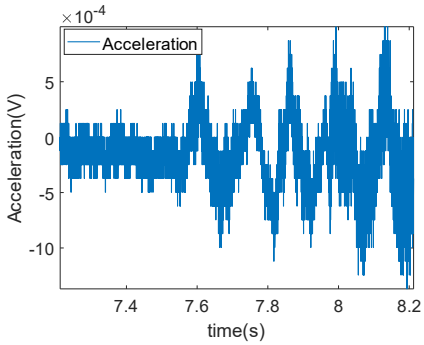
<그림 2.1.33c 1차 현장시험(PC 갱문 개방)의 B2위치 마이크로폰 데이터 FFT 분석>

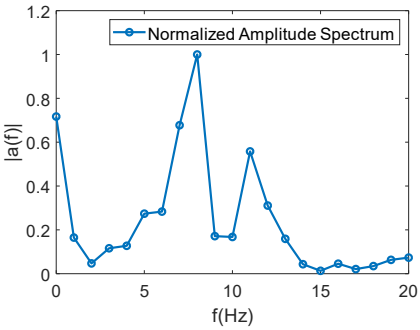


(a) 전체 가속도 데이터



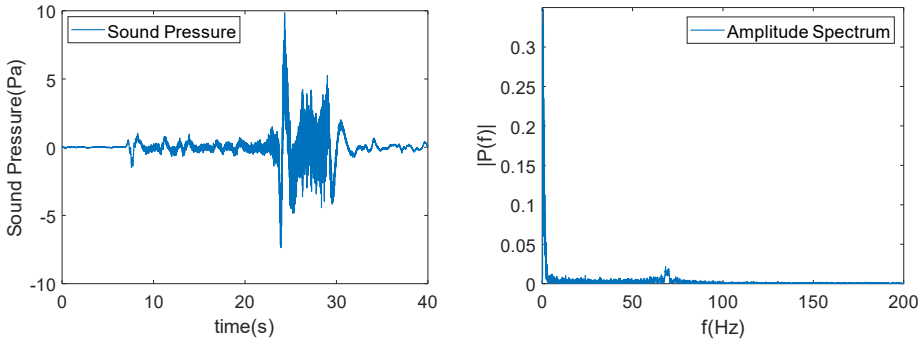
(b) 전체 가속도 데이터의 FFT 결과



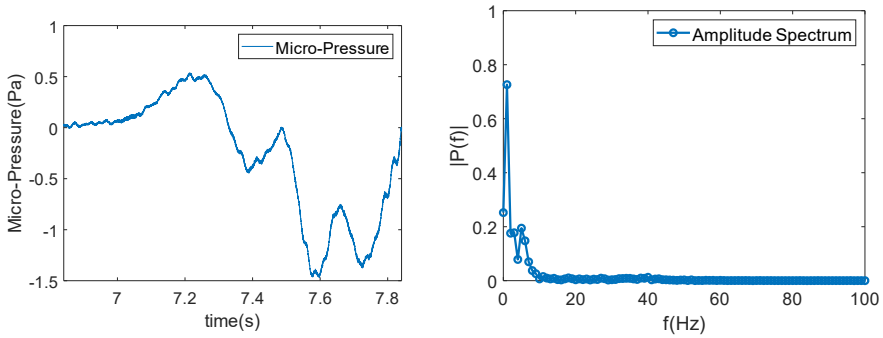


(c) 미기압파로 인한 가속도 (d) 미기압파로 인한 가속도의 FFT 결과

<그림 2.1.34c 2차 현장시험(PC 갱문 폐쇄)의 컨테이너박스 가속도 데이터 FFT 분석>



(a) 전체 음압데이터 (b) 전체 음압데이터의 FFT 결과



(c) 첫 번째 미기압파 펄스 신호 (d) 첫 번째 미기압파의 FFT 결과

<그림 2.1.35c 2차 현장시험(PC 갱문 폐쇄)의 B2위치 마이크로폰 데이터 FFT 분석>

(라) TEST-BED에서의 후드 구조체의 미기압파 저감성능에 대한 공인기관 시험성적서

○ 오송 테스트-배드에서 후드 시작품에 대한 미기압파 저감 성능검증 현장시험을 수행하였으며, 이에 대한 성과점검 기준에서 “TEST-BED에서의 후드 구조체의 미기압파 저감성능 ”(A-2-1)에 대한 공인시험성적서를 KTL(한국산업기술시험원)로부터 다음과 같이 발급 받았음.



<그림 2.1.36c TEST-BED에서의 후드 구조체의 미기압파 저감성능에 대한 KTL 공인시험성적서>

라. 터널들의 미기압파 영향 DB 구축

(1) 스페인 AVE RenFe 고속철도의 초장대터널 La Cabrera Tunnel 현장시험

(가) 초장대터널 La Cabrera Tunnel 계측시험 주요 현황

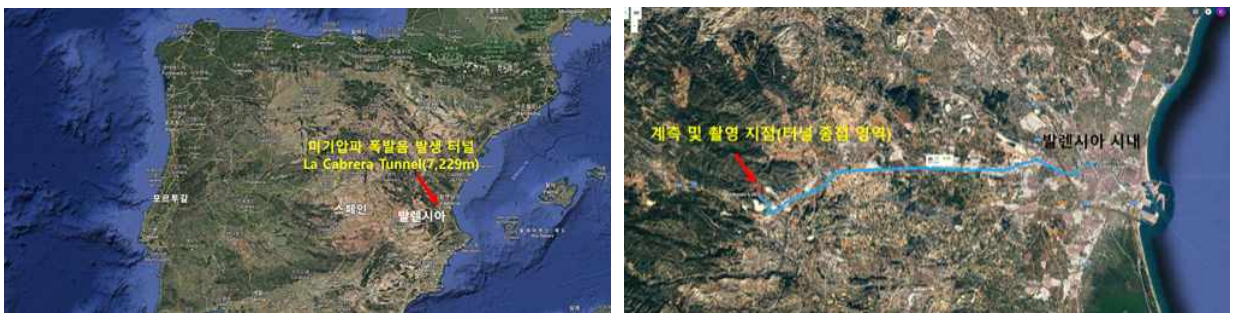
○ 스페인 AVE RenFe 고속철도[그림 2.1.1d]의 터널 미기압파 폭발음 발생 터널 현장계측 데이터를 확보를 위하여 스페인 터널 미기압파 발생 현장방문을 통하여 터널에서 폭발음 현장의 크기별 녹음 및 촬영을 하고 미기압파 측정을 수행하였음.

○ 매우 큰 데시벨의 미기압파 폭발음과 주파수 특성 자료 확보를 통하여, 본 과제수행의 주민 민감도 테스트와 터널 미기압파 허용기준 기반자료를 확보하였음.

○ 마드리드에서 출발하거나 마드리드를 경유하여 발렌시아로 운행하는 고속열차를 포함하여 스페인 인접 국가에서 발렌시아까지 운행하는 고속열차들이 운행하는 노선이며 독일 프랑스를 비롯하여 스페인 고속열차까지 다양한 고속열차가 운행되고 있음[표 2.1.1d].

<표 2.1.1d 고속철도 및 La Cabrera 터널 주요 제원>

계측일자	시험위치	운행열차 종류	운행차량속도	터널제원
2018.09.23 ~ 2018.09.24	La Cabrera Tunnel East Portal La Cabrera Tunnel West Portal	- AVE Talgo train - Avante Series 121(ICE train) - AVE TGV train	250km/h ~ 289km/h	- 단선병렬터널 - 터널연장 : 7,299m - 터널내공단면적 : 53m^2



<그림 2.1.1d AVE RenFe 고속철도 현장시험 계측지점>

(나) TEST-BED 현장 계측시험 조건

○ 주요 계측항목은 저주파 음압계(RION NL-62)를 통한 폭발음 시그널 계측, 고 데시벨 전용 동영상 캠코더 및 음향 레코더를 통한 폭발음 녹음 수행, 일반 동영상 기록기를 통한 주행속도 계측을 수행하였음[그림 2.1.3d].

○ 계측조건은 Cabrera Tunnel East Portal의 중심으로부터 약 30m 지점과 Cabrera Tunnel East Portal의 중심으로부터 약 45m 지점의 울티리 밖에서 계측시험을 수행함[그림 2.1.2d].



(a) 터널 입구부(경사갱문 설치)



(b) 터널 출구부(경사갱문과 터널내공 확폭후드 설치)





(c) 터널 출구부의 계측 및 녹화 위치

<그림 2.1.2d La Cabrera 터널 현장시험 수행지점>







<그림 2.1.3d La Cabrera 터널 현장시험 수행 계측기 사진>

○ 스페인 AVE Talgo 고속열차는 최고속도 300km/h 운행차량으로 터널 진입속도 약 289km/h로 운행함(하행 열차). ICE 고속열차는 최고속도 250km/h 운행차량으로 터널 평균 진입속도는 약 250km/h 정도로 운행하였음(하행 열차).

○ 터널 진입속도 250km/h 고속열차에서도 289km/h 진입 고속열차에서 발생되는 폭발음과 체감적으로는 거의 동일한 폭발음이 발생함. 상행으로 주행하는 경우(발렌시아 출발 고속열차)는 터널 진입속도가 180km/h 이하로 운행하는 것으로 계측됨. 폭발음이 발생되는 갱문 주변에는 민가, 농장 및 공장 등 아무런 시설이 존재하지 않으나, 반대편 터널 갱문 주변에는 농가와 변전소 관련 건물이 존재함.

(다) La Cabrera Tunnel 현장시험 계측 결과

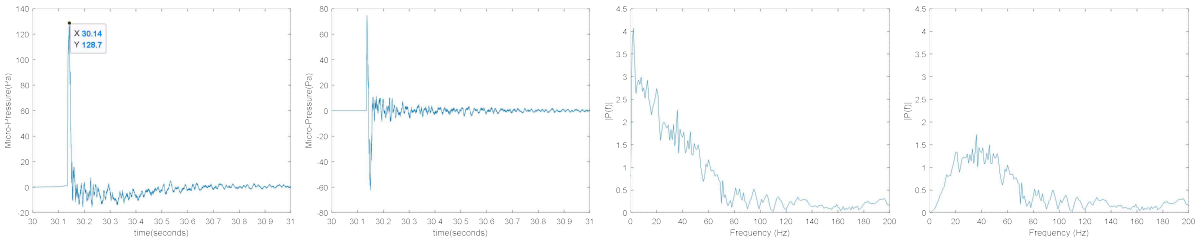
○ 표 2.1.2d는 La Cabrera 터널의 현장시험을 분석한 것으로 측정결과를 살펴보면 독일 기준인 115dB(C)과 일본 기준인 50Pa을 상당히 초과하고 있는 것을 알 수 있음.

○ 그림 2.1.4d는 스페인에서 측정한 미기압파 신호 분석결과를 보여줌. 그림 (a)와 (b)는 각각 측정된 미기압파의 Z-보정(Z-weighting), C-보정(C-weighting) 데이터이고 그림 (c)는 Z-보정 미기압파 데이터의 FFT분석을 수행한 것이며 (d)는 C-보정 미기압파 데이터를 FFT분석 수행한 것임. (c)와 (d)의 FFT분석은 해당 미기압파 데이터의 200Hz까지 분석을 수행하였음.

○ 스페인 현장시험 결과, 터널 미기압파는 폭발음과 잔향까지 고려하더라도 200Hz 이하의 저주파 분포임. 그러나 피크 값을 제대로 잡는 것이 중요하여 sampling rate를 48kHz로 하였으며, 스페인 미기압파 계측 그래프에서 보면 peak duration time이 0.02초 내외임.

○ Z-보정 신호를 주파수 분석한 결과에서, 미기압파는 20Hz 미만의 주파수 성분이 높은 비율로 포함되어 있었고, 이 저주파 성분을 무시 할 경우 미기압파 최대값이 실제보다 작게 평가될 수 있음을 알 수 있었음.

○ C-보정으로 받은 신호의 경우, C-보정 곡선에서 제시한 방법대로 저주파 대역의 신호가 필터링된 것을 확인 하였고, 이에 따라서 피크 값의 크기도 작게 계산되고 파형도 초저주파 대역이 제거된 신호특성을 보였음. 청각상의 대단한 폭발음은 20Hz~60Hz 구간에서 크게 기여하고 있음을 알 수 있음.



(a) Z-보정 미기압파 (b) C-보정 미기압파 (c) Z-보정 FFT (d) C-보정 FFT

<그림 2.1.4d 스페인 Cabrera 터널 1st run 미기압파 데이터분석 결과(289km/h)>

<표 2.1.2d 터널 미기압파 계측 결과>

Index	Train speeds	Operation trains	Measurement positions from tunnel exit	Peak values of micro pressure wave			
				Z-weighting Pa (일본기준 50Pa)	Z-weighting dB	C-weighting Pa	C-weighting dB (독일기준 115Pa)
1st RUN	289km/h	Talgo	45 m	128.69 Pa	136.2 dB(Z)	74.73 Pa	131.5 dB(C)
2nd RUN	289km/h	Talgo	30 m	145.66 Pa	137.3 dB(Z)	68.33 Pa	130.7 dB(C)
3rd RUN	250km/h	ICE	30 m	90.71 Pa	133.1 dB(Z)	42.56 Pa	126.6 dB(C)
4th RUN	289km/h	Talgo	30 m	161.93 Pa	138.2 dB(Z)	87.68 Pa	132.8 dB(C)

○ 스페인 La Cabrera Tunnel 종점의 주변 환경과 계측 결론



Google Map Address : 39.449631, -0.795511

- 반경 2km이내에 민가나 목장, 논밭, 과수원, 공용도로가 없고 협곡 안에 터널 미기압파 발생원이 존재하여 방치 (주민의 이동이 전혀 없는 지역)
- 폭발음은 진폭(소리의 크기)이 크고 파장(저주파 성분)이 크지만 La Cabrena Tunnel 종점에서 발생하는 미기압파는 협곡 깊은 영역 안에서 발생하여 즉, 산이 병풍 역할을 하여 2km 이상 방사하기 어려운 환경임
- 실제 현장에서 듣는 폭발음과 녹음 후에 동영상과 함께 듣는 폭발음은 매우 큰 차이가 있음. 즉, 현장 계측 녹음의 재생 시 폭발음 소리는 M16소총 소리처럼 들리나 실제 현장에서는 대포 소리와 같음

(2) 강릉선 복선터널 현장시험

(가) 강릉선 현황

○ 고속선에서 발생하는 터널 미기압파의 영향을 평가하기 위하여 2017년 12월22일에 개통한 강릉선(원주-강릉 신선)[그림 2.1.5d]에서 터널 미기압파 현장시험을 추진함. 2차년도 시험에서는 그림 2.1.6d과 같이 만종-횡성, 횡성-둔내 구간에서 복선터널들 중 3개의 터널에서 미기압파 데이터 베이스 구축 현장시험을 적용하였음. 표 2.1.3d에 3개 터널에 대한 주요제원을 정리하였음.



<그림 2.1.5d 강릉선 KTX 고속철도>



(a) 의관터널 (b) 둔둔터널 (c) 정금터널

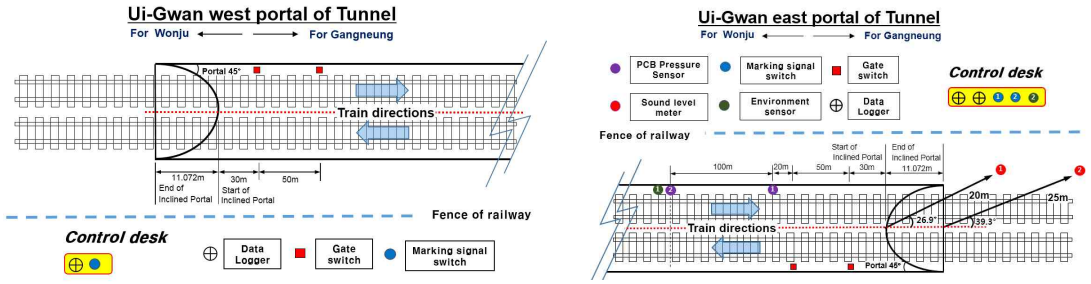
<그림 2.1.6d 강릉선 TEST-BED 현장시험 터널 전경>

<표 2.1.3d 강릉선 DB구축 현장시험 3개 터널 주요제원>

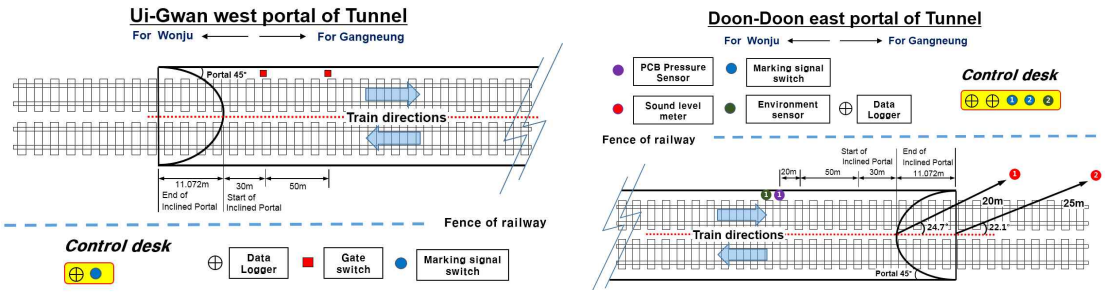
구간	터널명	터널길이	서원주기점 (키로지점)	터널단면적 (UIC 기준 단면적)
만종-횡성	의관터널	1,745m	시점:15K461	68.56m^2(동일)
			종점:17K206	
	둔둔터널	914m	시점:17K481	
			종점:18K395	
횡성-둔내	정금터널	4,727m	시점:34K167	
			종점:38K874	

○ 강릉선 복선터널들의 단면적은 68.56m^{2}로 동일하며 콘크리트 궤도를 적용하고 있으면 터널 내부 양측에 유지보수통로(walkway)가 있음. 강릉선 KTX-산천 열차는 기본 10량 1편성으로 열차길이가 201m이고 동력차 2대와 객차 8대로 구성됨.

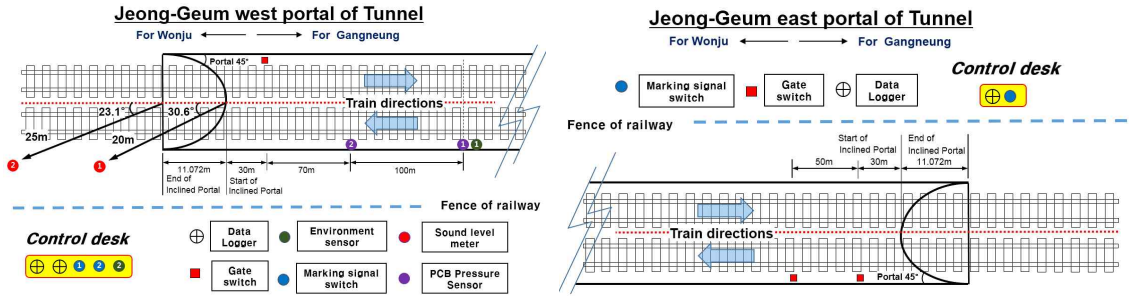
○ 터널 미기압파를 계측하기 위한 터널별 계측시스템[그림 2.1.7d ~ 그림 2.1.9d]은 열차진입속도 계측을 위한 포토센서(Keyence, PZ-G41N), 터널 내부압력 계측을 위한 압력센서(PCB 106B50) 및 터널 미기압파 계측을 위한 음압계(RION NL-62)등을 포함[그림 2.1.10d]하고 있으며 열차운행 중 선로변 접근이 어려우므로 모든 계측센서는 그림 2.1.11d와 같이 계측데스크로 케이블을 연장하여 데이터 로거(HIOKI, MR8875)를 통해 취득하였음. 현장시험 터널별 마이크로폰 설치 위치는 경사갱구의 시작지점으로부터 20m와 25m위치[그림 2.1.7d ~ 그림 2.1.9d]에서 계측을 수행하였음[표 2.1.4d].



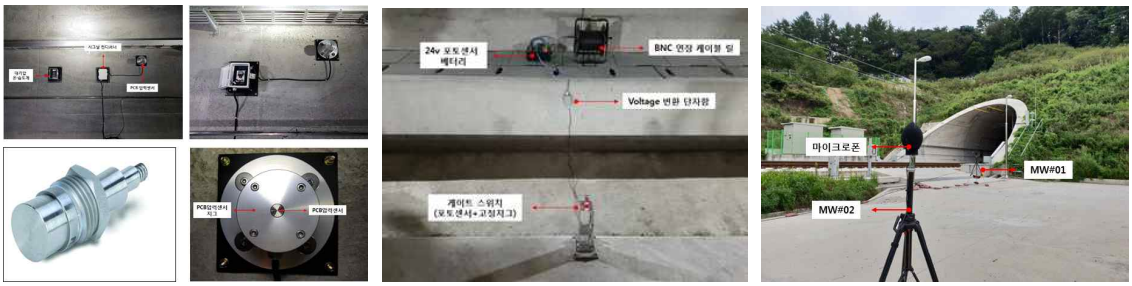
<그림 2.1.7d TEST-BED 구간 의관터널 현장시험 개요도>



<그림 2.1.8d TEST-BED 구간 둔둔터널 현장시험 개요도>



<그림 2.1.9d TEST-BED 구간 정금터널 현장시험 개요도>



<그림 2.1.10d 터널 내·외부 계측시스템>



<그림 2.1.11d 터널 시·종점 계측데스크>

<표 2.1.4d 터널별 마이크로폰 설치위치>

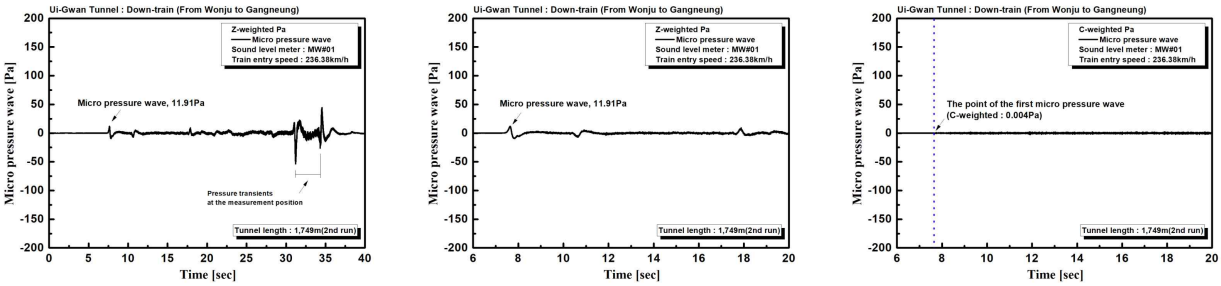
구분	마이크로폰 설치위치	
	설치방향	설치위치
의관터널	터널 동쪽 갱문	터널의 동쪽 경사갱구 시작지점을 기준으로 20m, 각도26.9° 위치 터널의 동쪽 경사갱구 시작지점을 기준으로 25m, 각도39.3° 위치
둔둔터널	터널 동쪽 갱문	터널의 동쪽 경사갱구 시작지점을 기준으로 20m, 각도24.7° 위치 터널의 동쪽 경사갱구 시작지점을 기준으로 25m, 각도22.1° 위치
정금터널	터널 서쪽 갱문	터널의 동쪽 경사갱구 시작지점을 기준으로 20m, 각도23.1° 위치 터널의 동쪽 경사갱구 시작지점을 기준으로 25m, 각도30.6° 위치

(나) 강릉선 현장 계측시험 결과

○ 그림 2.1.12d ~ 그림 2.1.14d는 각각 터널별 열차의 터널 진입 시 발생하는 피크 펄스 형태의 음압계 데이터를 나타낸 것으로, 고속열차가 마이크로폰에 통과 전 피크 형태의 미기압파가 발생하는 것을 볼 수 있으며 표 2.1.5d ~ 표 2.1.7d에 터널별 미기압파 계측 데이터를 정리하였음.

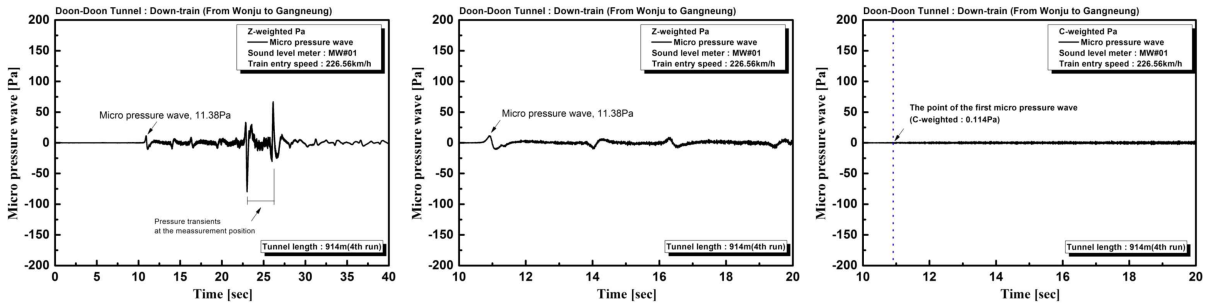
○ 의관터널(연장 1,745m), 둔둔터널(연장 914m), 정금터널(연장 4,727m)의 터널 미기압파 계측결과인 그림 2.1.12d ~ 그림 2.1.14d의 (c)는 계측된 미기압파의 주파수 성분을 알아보기 위해 C-weighting을 분석을 적용한 것임. 가중치를 적용하지 않은 Non-weighting 데이터에서 터널 미기압파 방출 구간을 확대한 그림 (b)는 터널 미기압파 방출 현상을 확인할 수 있으나 C-weighting 필터를 적용한 그림 (c)에서는 동일한 시간에서 보였던 터널 미기압파 피크 형상이 보이지 않고 데이터 값이 거의 0으로 사라짐을 볼 수 있음. 이것은 의관터널, 둔둔터널, 정금터널의 터널 미기압파가 대부분 초저주파 영역대(10Hz 이하)의 주파수 성분을 가지고 있음을 의미함.

○ 강릉선 현장시험에서 KTX-산천 고속열차 진입속도 205km/h ~ 237km/h의 범위에서 터널 내부의 최대 압력변동량은 900Pa이하이고, 터널 출구 20m에서 터널 미기압파 피크치는 13Pa이하로 계측됨. 250km/h 미만 운행에 대한 유럽기준(EN 14067-5)에서 터널내 풍압 최대치는 3,000Pa 이하가 되도록 권장하고 있으므로 이 기준보다 1/3 정도의 풍압이 발생된다고 볼 수 있음(계측 위치가 터널 중간이 아니지만 10% 상승한 값으로 분석). 미기압파 계측 위치에서 일본 허용기준은 50Pa 이하이며 일본 허용기준보다 1/4정도임(주파수 분석에서 10Hz 이하라 비가청 미기압파 수치임).



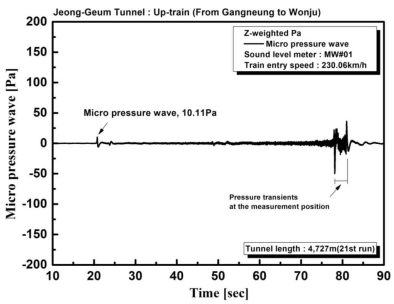
(a) 미기압파와 열차 통과 (b) 미기압파 부분 확대 (c) C-weighting Pa

<그림 2.1.12d 의관터널 갱구 20m지점 터널 미기압파 계측데이터(진입속도 236.38km/h)>

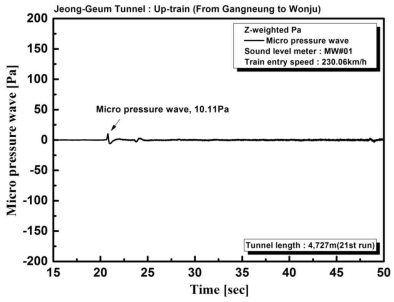


(a) 미기압파와 열차 통과 (b) 미기압파 부분 확대 (c) C-weighting Pa

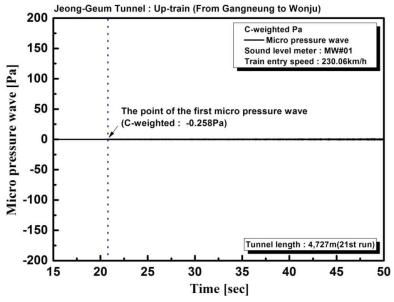
<그림 2.1.13d 둔둔터널 갱구 20m지점 터널 미기압파 계측데이터(진입속도 226.56km/h)>



(a) 미기압파와 열차 통과



(b) 미기압파 부분 확대



(d) C-weighting Pa

<그림 2.1.14d 정금터널 갱구 20m지점 터널 미기압파 계측데이터(진입속도 230.06km/h)>

<표 2.1.5d 의관터널 운행별 터널 미기압파 최대값>

Run No.	열차진행방향	열차진입속도 [km/h]	터널 미기압파 MW#01 [Z-weighting, Pa]
2nd run	하행	236.38	11.91
4th run	하행	235.14	12.47
5th run	하행	234.83	10.62
8th run	하행	235.76	11.78
9th run	하행	235.14	11.55
12th run	하행	227.27	9.36
평균		233.40	11.28

<표 2.1.6d 둔둔터널 운행별 터널 미기압파 최대값>

Run No.	열차진행방향	열차진입속도 [km/h]	터널 미기압파 MW#01 [Z-weighting, Pa]
1st run	하행	224.16km/h	11.21
2nd run	하행	224.72km/h	11.65
3rd run	하행	223.88km/h	10.64
4th run	하행	226.56km/h	11.38
5th run	하행	220.72km/h	10.38
6th run	하행	205.36km/h	6.77
평균		220.90	10.34

<표 2.1.7d 정금터널 운행별 터널 미기압파 최대값>

Run No.	열차진행방향	열차진입속도 [km/h]	터널 미기압파 MW#01 [Z-weighting, Pa]
1st run	상행	229.31km/h	12.33
3rd run	상행	225.92km/h	10.50
5th run	상행	228.37km/h	10.93
7th run	상행	226.49km/h	9.78
9th run	상행	212.40km/h	7.15
11th run	상행	226.97km/h	9.52
13th run	상행	226.87km/h	10.02
15th run	상행	221.08km/h	9.04
17th run	상행	228.37km/h	10.41
19th run	상행	226.64km/h	8.56
21st run	상행	230.06km/h	10.11
평균		225.68km/h	10.04

(3) 오송 종합시험선로 TEST-BED 현장시험

(가) 오송 종합시험선로 TEST-BED 구간

○ 그림 2.1.15d는 오송 종합시험선로 TEST-BED 구간의 제2터널과 제5터널 전경이며 오송 종합시험선로 시점으로부터 4.4km, 7.5km 지점에 위치한 시험터널임. 제2터널과 5터널 모두 단선터널이며 터널의 형상은 말발굽 형태로 터널 단면적은 각각 43.36m^{2}과 50.3m^2 임[표 2.1.8d]. TEST-BED 현장시험에 적용된 운행열차는 KTX-산천 10량 1편성의 고속열차로 터널진입속도 약 180km/h ~ 200km/h 시험운행 하였음.

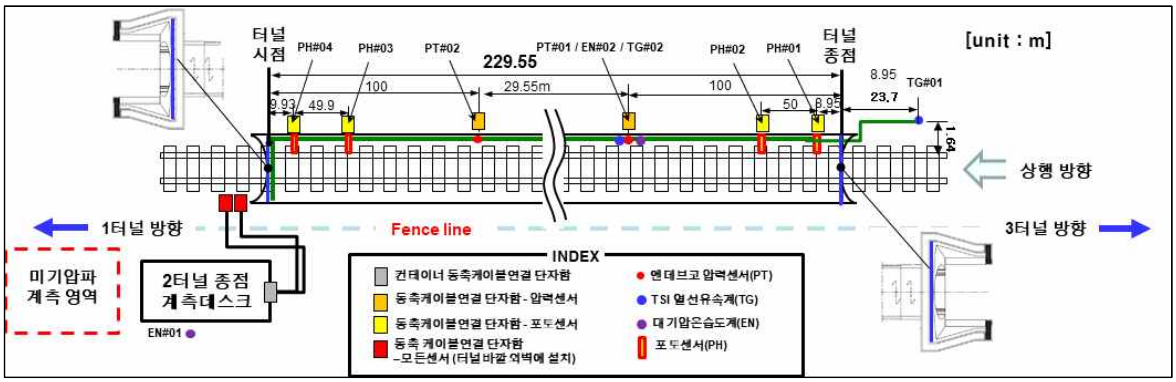


<그림 2.1.15d TEST-BED구간 제2터널 종점(좌), 제5터널 종점(우)>

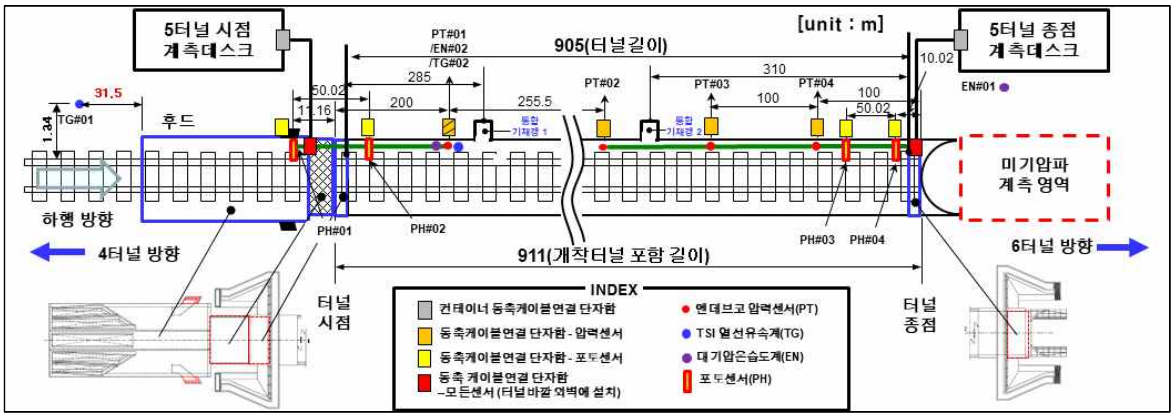
<표 2.1.8d 시험 제2터널, 제5터널 주요 제원>

형식	시험 제2터널	시험 제5터널
터널 유효단면적	43.36m^2	50.3m^2
시험열차 단면적(KTX-산천)	10m^2	10m^2
터널길이	229m	905m(PC갱문 포함 911m)
궤도형식	발라스트 궤도	발라스트 궤도
기타	기재갱 없음	터널 내부 통합기재갱 2개소
열차/터널 단면적 비 (Blockage ratio)	0.2306	0.1988

○ TEST-BED 제2터널의 제5터널의 터널 공기역학 특성 분석 및 미기압파 계측을 위하여 그림 2.1.16d와 그림 2.107d와 같이 현장계측시스템을 구축하였음. 터널 내부에는 터널내부 압력변동을 계측하기 위하여 제2터널에는 2개소, 제5터널에는 4개소의 압력센서(ENDEVCO 8510B-2)를 설치하였음. 터널 시점과 터널내부에는 열차진입 전·후에 의한 풍속 및 대기압, 온도, 습도를 계측하기 위하여 열선유속계(TSI-8465)와 대기압 온·습도계(Lutron MHB-382SD)를 설치하여 계측하였음. 열차의 터널 진입속도와 진출속도는 터널 입구와 출구에서 각각 2개소의 포토센서(Keyence, PZ-G41N)를 침목위에 설치하여 두 지점의 거리와 열차의 포토센서 설치위치의 통과시간을 계측하여 속도를 산정하였음.



<그림 2.1.16d 오송시험선 제2터널 계측시스템 구성 개요도>

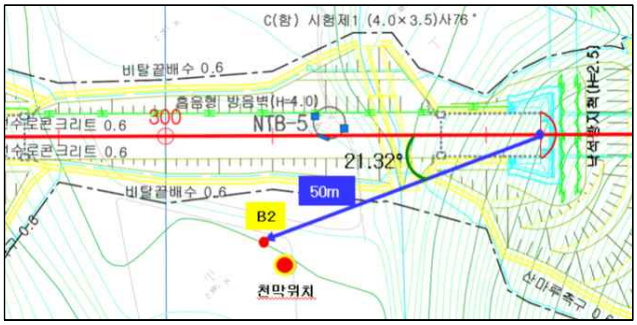


<그림 2.1.17d 오송시험선 제5터널 계측시스템 구성 개요도>

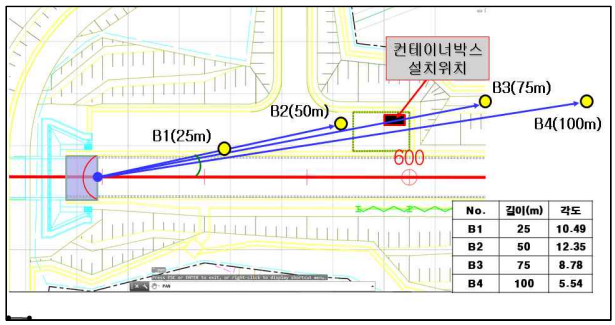
○ 제2터널의 터널 미기압파 계측은 선로가 안전펜스로 막혀 있고 주변이 계곡과 산지지형으로 유일한 계측가능위치는 터널 시점의 50m 지점 1개소였음. 따라서 2터널 미기압파 계측은 종점으로 진입하는 열차를 기준으로 시점에서 계측하였음. 반대로 제5터널 미기압파 데이터는 종점의 개활지에 마이크로폰(헤드 UC-59L, Rion NL-62 음압계)을 4개소 [그림 2.1.18d]에 설치하여 측정하였음. 그림 2.1.19d와 2.1.20d에 터널 미기압파 계측 위치를 표시하였음.



<그림 2.1.18d 터널별 마이크로폰 설치 전경(제2터널(좌), 제5터널(우))>



<그림 2.1.19d 시험 제2터널 마이크로폰 설치위치>



<그림 2.1.20d 시험 제5터널 마이크로폰 설치위치>

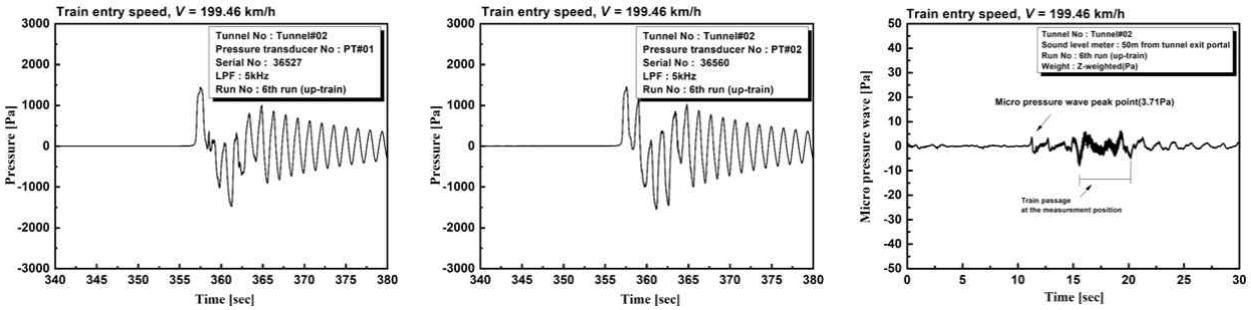
(나) 오송 종합시험선로 TEST-BED 구간 현장시험 결과

○ 그림 2.1.21d (a), (b)는 제2터널 내부의 압력변동 데이터이며 열차진입(V=199.46km/h)으로 급격한 압력상승을 보이나 전형적으로 나타나는 비점성 영역의 1차 압력상승 후의 점성 2차 압력상승 패턴은 충분히 나타나지 않음. 이것은 비교적 짧은 터널길이에 의해 압력파가 완전히 발달하지 못하고 출구의 반사파가 먼저 도달하는 현상으로 보여짐.

○ 제5터널의 경우 터널 진입속도 204.49km/h에 대하여, 첫 번째 압축파가 터널 시점으로부터 종점까지 전달되는 과정을 확인할 수 있음(그림 2.1.22d (a), (b)). PT#01(터널시점으로부터 200m 위치)에서 열차진입으로 인한 급격한 압력상승으로 파면이 수직으로 발달하였음(그림 2.1.22d (a)). 제5터널의 내부압력 상승 경향은 먼저 파면이 수직 상승 이후에 열차와 터널 사이의 협소한 공간 사이로 발생하는 점성 압력상승이 2차적으로 나타나는 경향을 뚜렷하게 확인할 수 있음(그림 2.1.22d (a)).

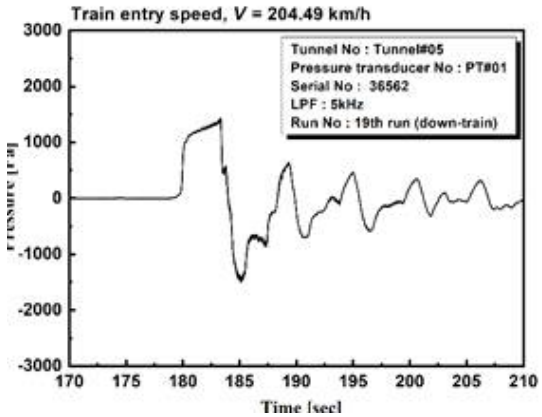
○ 제2터널의 B2위치 미기압파의 크기[그림 2.1.21d (c)]는 제5터널의 미기압파 크기(B2 위치) 대비 비교적 크게 나타났으며 이것은 제2터널의 단면적이 제5터널의 단면적에 비해 작기 때문에 폐색율이 커짐에 따라 미기압파의 크기도 커진다고 볼 수 있음. 터널 미기압파 최대값은 열차진입속도 199.46km/h에서 3.71Pa 이었음.

○ 그림 2.1.23d에는 제5터널 총 4개소 위치에서 미기압파를 계측함으로써 거리별 미기압파 감쇠 경향을 확인할 수 있으며 25m씩 계측거리 증가에 따라 점차 감소하는 경향을 보였음. 터널 종점으로부터 100m 위치(B4)까지 터널 미기압파 전달되는 것이 정량적으로 확인할 수 있었음. B1지점을 기준으로 터널 미기압파 최대값은 열차진입속도 200.93km/h에서 5.90Pa이었음. 표 2.1.9d와 표 2.1.10d에 터널별, 운행별 터널 미기압파 데이터를 정리하였음.

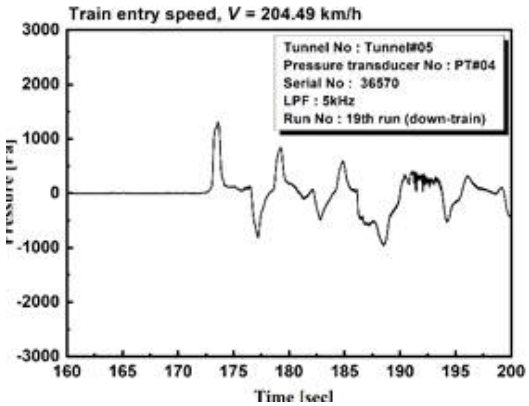


(a) PT#01 (b) PT#02 (C) MW#02

<그림 2.1.21d 시험 제2터널 터널내부 압력파 및 터널 미기압파 데이터>

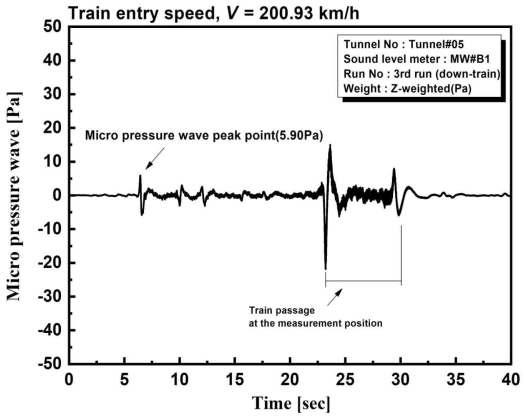


(a) PT#01

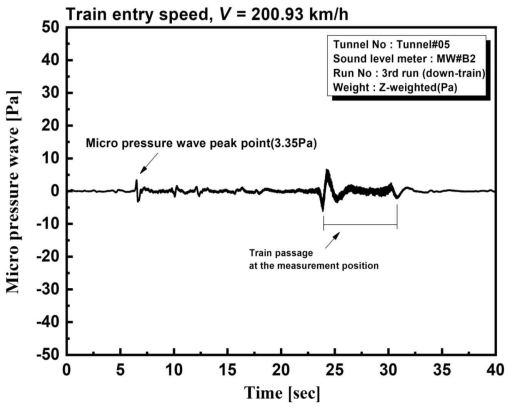


(b) PT#04

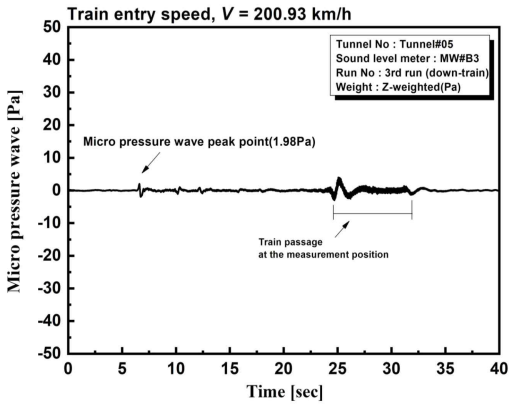
<그림 2.1.22d 시험 제5터널 터널내부 압력파 데이터>



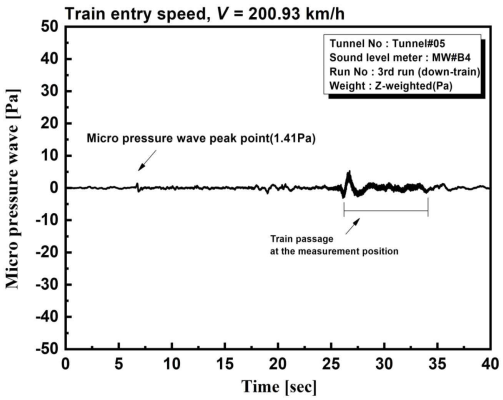
(a) MW#B1



(b) MW#B2



(c) MW#B3



(d) MW#B4

<그림 2.1.23d 시험 제5터널 종점 B1 ~ B4의 터널 미기압파 데이터>

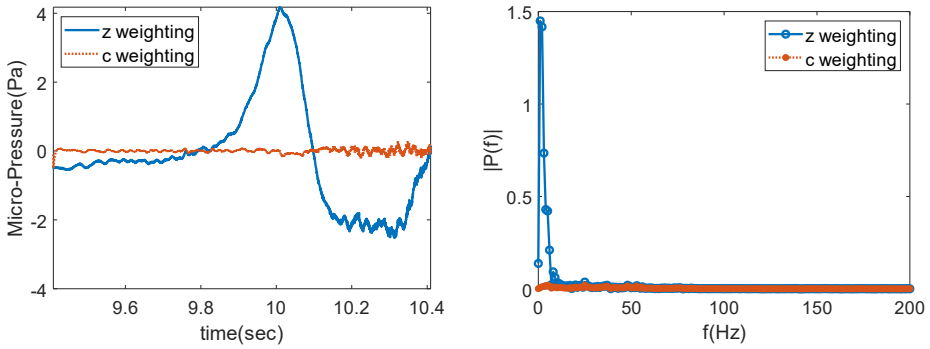
<표 2.1.9d 제2터널 운행별 미기압파 계측데이터>

Run No.	열차운행방향	Train entry speed (km/h)	MW#B2(Pa)
Run#02	상행	189.07	2.53
Run#04	상행	200.75	3.71
Run#06	상행	199.46	3.71
Run#08	상행	200.17	2.93
Run#10	상행	178.57	2.03
Run#12	상행	181.80	3.88
Run#14	상행	179.86	2.37
Run#16	상행	180.54	2.38
Run#18	상행	200.48	4.16
Run#20	상행	200.30	3.74

<표 2.1.10d 제5터널 운행별 미기압파 계측데이터>

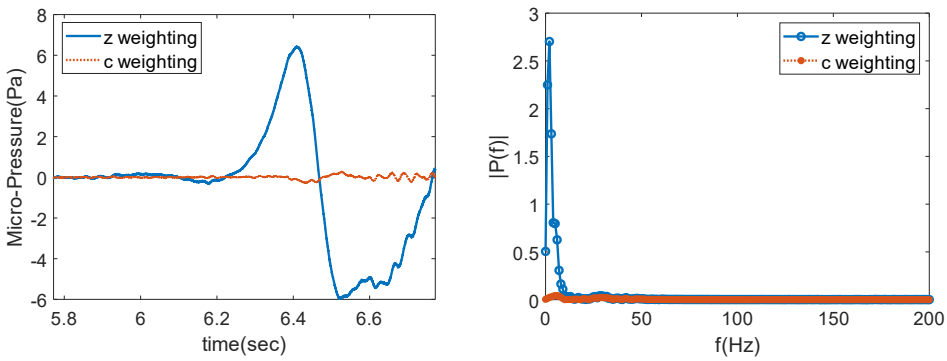
Run No.	열차운행 방향	Train entry speed (km/h)	MW#B1(Pa)	MW#B2(Pa)	MW#B3(Pa)	MW#B4(Pa)
Run#03	하행	200.93	5.9	3.35	1.98	1.41
Run#05	하행	202.97	6.14	3.56	2	1.18
Run#07	하행	203.56	6.33	3.48	1.98	1.39
Run#09	하행	183.15	3.95	2.25	1.26	1.31
Run#11	하행	183.6	4.34	2.31	1.3	0.85
Run#13	하행	183.15	4.13	2.24	1.49	0.76
Run#15	하행	180.11	4.18	2.82	1.17	0.82
Run#17	하행	204.58	6.43	3.44	1.91	1.31
Run#19	하행	204.49	6.37	3.55	2.37	1.15

○ 그림 2.1.24d와 그림 2.1.25d는 제 2터널과 제5터널에서 계측된 터널 미기압파 데이터를 FFT 분석을 수행한 것이며 미기압파의 주요성분이 10Hz이하 성분으로 이 중에서 큰 성분은 1.25Hz이하 성분으로 미기압파 펄스의 저주파 영역의 신호가 주요 성분임을 알 수 있음. 그림 2.1.24d(a), 그림 2.1.25d(a)와 같이 C-weighting 신호로 적용한 경우 미기압파 펄스의 파형을 확인하기 어려울 정도로 큰 파형이 사라짐을 알 수 있음. 그림 2.1.24(b)와 그림 2.1.25(b)의 C-weighting 신호의 주파수 분석 결과는 모든 주파수 성분이 거의 0에 가깝게 나타나는 것을 확인할 수 있음. 따라서 제2터널과 제5터널에서 측정한 미기압파 데이터는 대부분 초저주파 성분을 가지고 있으며 20Hz~60Hz 영역에서 나타나는 폭발음 등은 확인할 수 없었음.



(a) 미기압파 펄스 신호 (b) FFT 분석

<그림 2.1.24d 제2터널 출구로부터 B2위치(터널출구로부터 50m위치)의 터널 미기압파 계측데이터 FFT분석 결과>



(a) 미기압파 펄스 신호 (b) FFT 분석

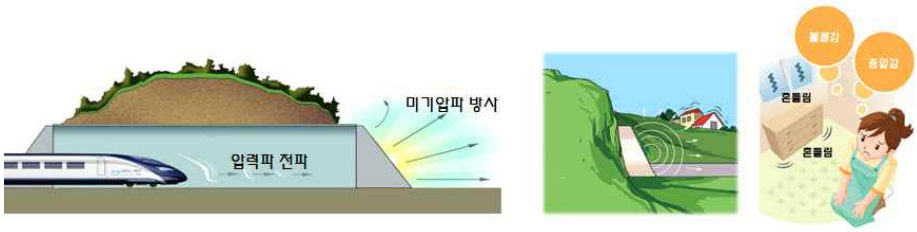
<그림 2.1.25d 제5터널 출구로부터 B1위치(터널출구로부터 25m)의 터널 미기압파 계측데이터 FFT분석 결과>

마. 미기압파 허용기준(안)과 절차서 및 해설서

(1) 터널 미기압파 허용기준(안)

(가) 터널 미기압파 영향

○ **정의** : 고속열차의 터널 진입 시 피스톤 효과와 같이 터널 내 공기가 압축되면서 압축파가 발생하여 터널 출구로 음속(시속 약 1,200km/h)으로 전파되는데, 이 압축파의 일부는 충격파의 형태로 터널 출구에서 외부로 방사됨. 이를 미기압파(micro-pressure wave)라고 함.



<그림 2.1.1e 터널 미기압파 발생 개요도>

○ **영향**

- 저주파의 충격파인 미기압파가 터널 출구에서 방출되면 민가의 창문 떨림이 발생하거나 심각한 경우 충격성 소음(폭발음)이 발생하여 터널 주변 주거환경에 영향을 미치게 되므로 민원 발생 요인이 되며, 이를 방지하기 위해 터널 진입 시 일부 감속 운행하거나 터널 단면적을 확장하여야 하는 경제적 시간적 불리함 발생
- 터널 미기압파의 강도(Pmax)는 열차단면적과 터널단면적의 비(폐색율 β)에 비례하며, 터널에 진입하는 열차속도(V)의 3승에 비례하여 증가함(터널연장이 1.5km 내외인 터널). 터널 연장이 5km이상 되면 열차속도(V)의 5승~7승에 비례하여 증가함.

$$P_{\max} \propto \beta \times V^{3}$$

- 또한, 터널 미기압파의 발생과 강도는 터널입구의 형상, 터널출구 주변의 지형환경, 터널 단면의 형상(기재갱 등), 궤도의 종류, 터널길이에 따라서도 변화됨.
- 터널 미기압파는 저주파 충격성 소음・진동으로 진폭과 파장이 매우 길어 선로변의 방음벽을 타고 넘어가기 때문에 방음벽으로 차폐가 불가능하며 1km~3km까지 방사해 나감. 민가에 충격음(폭발음)과 동시에 민가의 가구나 창틀에 심한 진동을 야기함. 반면에 열차운행 소음은 방음벽 안쪽에서 청음 시에 매우 크게 들리나 진폭과 파장이 짧아서 방음벽으로 대부분 차단이 됨.

(나) '터널 미기압파' 영향의 국내・외 철도터널 현황

○ 국내 현황 및 국외 사례 : 국내의 경우에 경부고속철도, 호남고속철도, 강릉선, 중앙선 등은 진입속도 대비 터널 내공단면적이 크기 때문에 '터널 미기압파' 문제 발생 없음.

<표 2.1.1e 세계 각국의 터널 미기압파 저감 대책 적용현황>

구분	우리나라			일본	독일	중국
	경부고속	호남고속	강릉선 중앙선			
터널단면적(㎡)	107(복선)	96.7(복선)	68(복선)	61~66(복선)	60.5(단선) 92.0(복선)	48.6(단선)
운행속도(㎞/h)	300	300	250	245 ~ 260	250 ~ 300 300(복선)	200
관리기준	없음			있음	있음	있음
미기압파 폭발음 발생여부	발생 없음			발생	발생(단선) 발생(복선)	발생
저감 대책	적용 없음			적용	적용	적용

○ 고속화철도(200km/h~250km/h)의 경우에 각국의 터널 최소 단면적은 다음과 같으며, 터널 연장별로 영향평가를 수행하여 미기압파 저감 대책을 터널 갱구 후드로 적용함.

<표 2.1.2e 고속화철도의 경우에 각국의 터널 최소 단면적>

구분	한국	일본	독일
터널단면적(㎡)	40(단선)	61~66(복선)	60.5(단선)
운행속도(㎞/h)	200 ~ 250	245 ~ 260	250 ~ 300
관리기준	없음	있음	있음
저감 대책	-	적용	적용
적용중인 최소단면적(㎡)	38.17(단선)	60.5(복선)	60.5(단선)

<표 2.1.3e 고속화철도(200km/h~300km/h)의 경우에 국내 터널 단면적 비교>

구분	중부내륙선 동해선 등	제안	강릉선 중앙선	수도권고속철도	
표준도 터널단면적(㎡)	40(단선)	-	64(복선)	57(단선)	90(복선)
UIC 국제규격 터널단면적 계산(㎡)	**40(단선)**	**64(복선)**	**68(복선)**	**57(단선)**	**92(복선)**
운행속도(㎞/h)	200 ~ 250	200 ~ 250	250	300	300
터널 미기압파 저감 대책	필요	필요	필요 없음	필요	필요
터널단면 표준도(KR)	있음	없음	있음	있음	있음
터널단면 설계상의 문제점	없음	전차선 형식 변경 필요	없음	없음	없음

※ 대부분의 국가에서 UIC 779-11의 터널 단면적 계산법을 준용함. 이에 대한 고시 필요함.

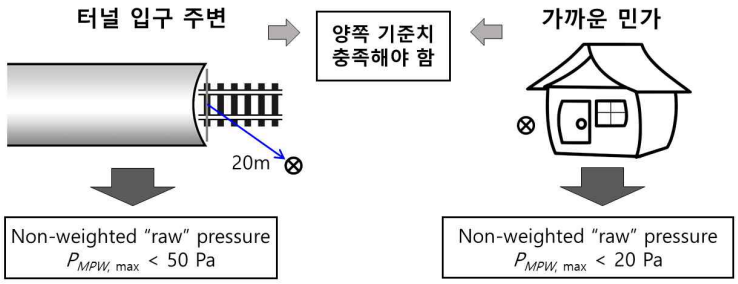
○ **(검토 결론)** 국내 EMU-250과 KTX-산천의 고속열차 단면적을 기준으로, 250km/h급 고속화철도에 대해서는 터널 단면적 약 64m^{2}이하에서 터널 미기압파 저감 대책이 필요하며, 300km/h급 고속철에서는 약 92m^{2}이하에서 필요함. 운행차량에 따라 차량단면적/터널단면적 비율인 차폐율은 다양함.

(다) 국내·외 터널 미기압파 관리기준

○ **(일본)** 1975년 신칸센 개통과 더불어, 터널 미기압파 폭발음 발생에 기인하여 미기압파 관리기준을 최초로 정립하였음.

* 일본 미기압파 관리기준 : 터널출구 20m에 거리에서 50Pa(128dB) 이하 유지, 민가에서는 20Pa(120 dB) 이하 유지, 50Pa 기준은 사람의 고막손상을 방지하기 위한 기준치이며, 민가의 20Pa 기준은 민가에서의 큰 충격음이나 문이나 창틀의 진동을 방지하기 위한 기준치임(기준치 2가지를 동시에 만족해야 함)

* 검토의견 : 일본 미기압파 관리기준은 기본적으로 음압을 Z-보정(Z-weighting, Non-weighting)의 특성으로 미기압파를 측정하거나 해석하기 때문에, 민가의 창틀이나 가구의 저주파 진동영향이 포함되어 있음. 즉 저주파 진동영향을 감쇠시켜서 평가하지 않음.



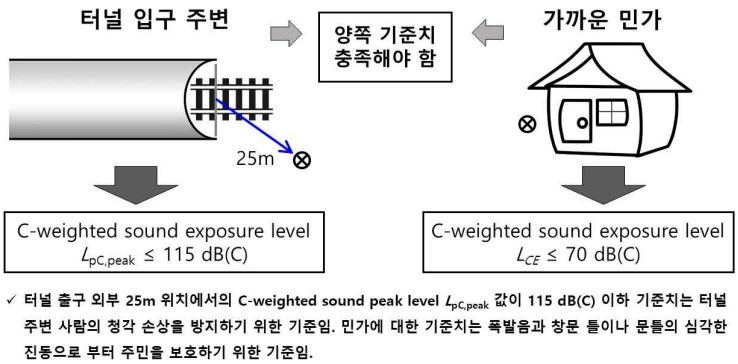
✓ 터널 출구 외부 25m 위치에서의 기준치는 폭발음에 의한 청각 손상을 방지하기 위한 기준임. 민가에 대한 기준치는 폭발음과 창문 틀(문틀)의 심각한 진동으로 부터 주민을 보호하기 위한 기준임.

<그림 2.1.2e 일본의 터널 미기압파 관리기준>

○ **(유럽-독일)** 2005년 Nuremberg-Ingolstadt 고속신선에서 터널 미기압파 폭발음 발생에 기인하여 2012년 미기압파 관리기준 정립하였으며 음향학적인 C-보정(C-weighting) 기준을 기반으로 함(유럽 EN기준으로 진입예정).

* 독일 미기압파 관리기준 : 터널출구 외부 25m 거리에서 $L_{pC,peak}$ = 115dB(C) 이하 유지(고막 손상 방지), 주거지는 L_{CE} = 70dB(C), 정원은 85dB(C) 그리고 공장지역은 90dB(C) 이하 유지

* 검토의견 : A-보정(A-weighting)은 여러 주파수의 소리 크기에 대한 일반적인 인간의 인식을 반영하지만 C-보정(C-weighting)은 충동적이고 비교적 낮은 주파수의 '소리'를 평가하는데 더 자주 사용되기 때문에 미기압파(MPW)에 더 적합하여 독일에서 적용함. 그러나 C-보정은 80Hz 미만의 저주파 진동에 대하여 감쇠가 심하게 적용되기 때문에, 미기압파 환경평가에서 민가의 창틀이나 가구의 진동을 간과할 수도 있음. 또한, 평가 방법이 어려워 일반 터널관련 설계회사에서 예측평가를 수행하기가 어렵고 전문연구기관에서만 수행 가능하다는 문제점이 있음.



<그림 2.1.3e 독일의 터널 미기압파 관리기준>

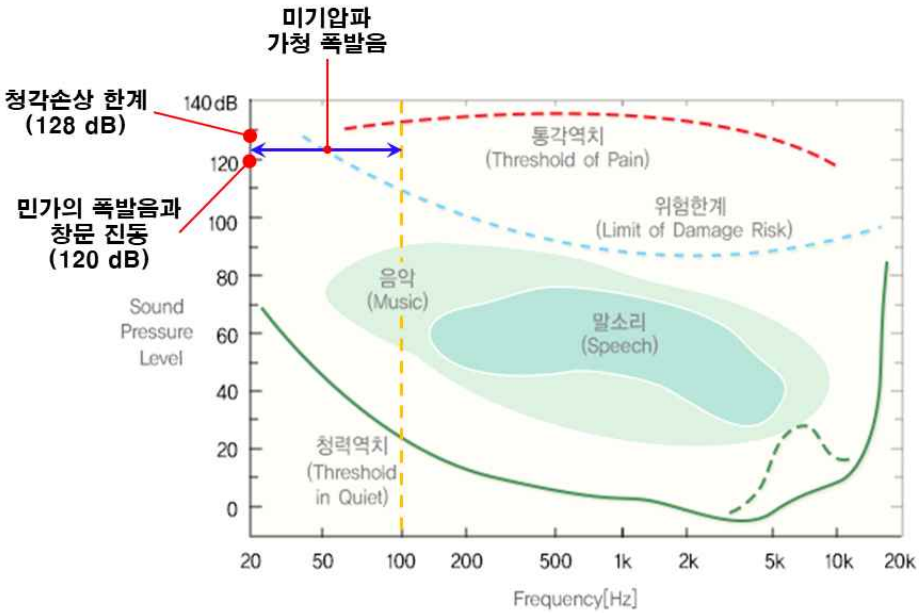
○ **(국내)** 철도설계기준(KDS 47 10 70 터널, 2016)의 2. 계획, 2.1 터널의 계획, (2)내공단면 계획에 다음과 같이 4항으로 "미기압파의 영향을 고려해야 한다"라고 선언적으로 명시되어 있으나 관리 기준치에 대한 언급이 없음.

* 4항 : 내공단면 계획 시에는 열차의 고속주행에 의하여 터널 내에 발생되는 공기저항 및 공기압 변화와 차량 밀폐도, 승차감 및 미기압파의 영향 등을 고려해야 한다.

* 검토의견: 국내 철도터널 설계관련 보고서(경부고속철도, 호남고속철도 등)에 일본의 기준과 유사한 "가장 가까운 관찰자(민가)"의 위치에서 20Pa(120dB) 한계가 관례적으로 적용되고 있으며, 가장 가까운 관찰자는 건물이나 고속도로 또는 일반인 출입이 가능한 지점을 의미함(국내 기준이나 지침에 기준치 명문화 없음). 터널 출구 부근에서의 고막손상에 대한 기준치는 적용하지 않고 있음.

(라) 터널 미기압파 관리기준(안)의 설정 근거

○ 소리의 크기와 위험도



<그림 2.1.4e 인간의 가청역과 소리의 음압분포(출처: 보건복지부 질병관리청)>

SPL(dB)	음압에 따른 소리와 역치와의 비	SPL(dynes/cm²)	해당 음압의 소리	위험도
0	1:1	.0002	들을 수 있는 한계	
10	3.16:1		낙엽 스치는 소리	
20	10:1	.002	조용한 도시의 아파트	
30	31.6:1		속삭임	
40	100:1	.02	조용한 라디오 음악	
50	316:1		낮은 목소리의 대화	
60	1,000:1	.2	정상적인 크기의 대화	불쾌한 자극
70	3,160:1		고급 승용차	대화불가능
80	10,000:1	2.0	교통량이 많은 거리	위험함
90	31,600:1		큰 트럭	손상가능함
100	100,000:1	20.0	판금공장	
110	316,000:1		착암기, 전기톱	
120	1,000,000:1	200.0	프로펠러 비행기	매우 위험함
130	3,160,000:1		고통을 느끼는 한계	
140	10,000,000:1	2,000.0	제트기 엔진	

<그림 2.1.5e 소리의 크기와 위험도(출처: 보건복지부 질병관리청, 감수: 대한의학회, https://health.cdc.go.kr/health/Main.do)>

- 본 기술개발의 스페인 현장시험을 통하여 미기압파의 가청 폭발음은 20Hz ~ 70Hz 사이에 분포하고 있었으며, 미국 교통부의 FRA 보고서[Federal Railroad Administration, 2015]에 따르면 100Hz까지 분포한다고 보고되었음. 즉, 가청 폭발음은 20Hz~100Hz까지 분포함을 알 수 있음(그림 2.1.4e 참조).
- 보건복지부 질병관리청의 “생활 속의 소음” 문건을 참조하면, 「소리의 크기와 위험도」에서 120dB(20Pa)은 청각에 매우 위험하며, 128dB(50Pa)은 청각 고통을 느끼는 한계에 해당함(그림 2.1.4e와 그림 2.1.5e 참조요망).

(마) 터널 미기압파 폭발음 발생 시 예상되는 피해

○ 터널 미기압파에 의한 예상되는 피해

- 철도터널 주변 축사 가축(소, 닭, 돼지 등)의 스트레스 유산
- 철도터널 주변 민가에서의 폭발음 발생과 동시에 문과 창틀의 충격성 진동
- 철도터널 주변 도로(고속도로/일반국도)에서 운행 중인 차량의 돌발 주행
  ※ 본 연구의 스페인 카브레라 철도터널 현장시험(2017년)에서 운동신경 자극 확인
- 철도터널 갱문부근 작업자, 보행자들의 고막손상 피해(안전펜스 외부영역 포함)

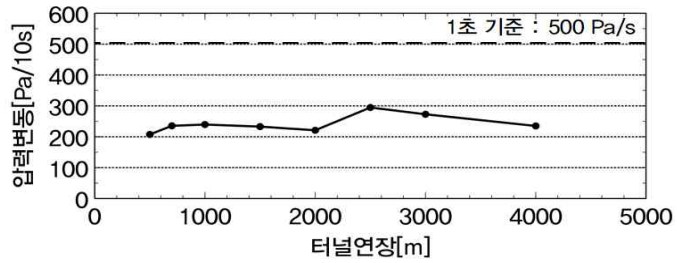
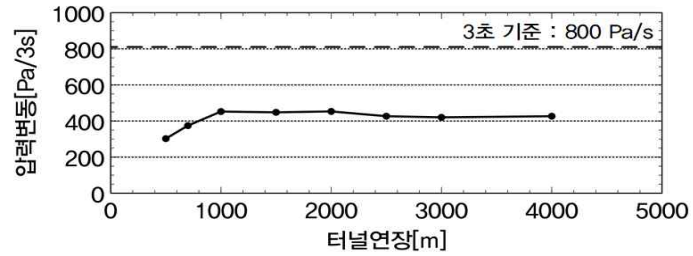
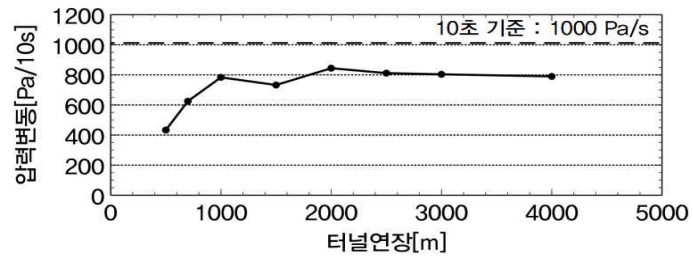
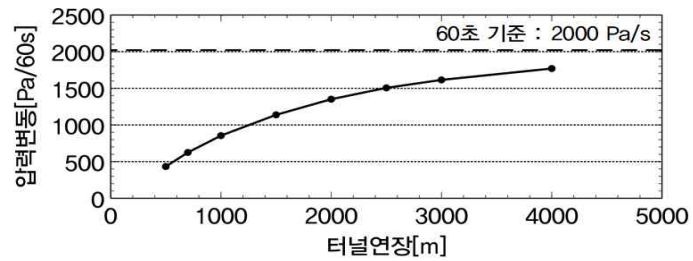
(바) 국내 단선터널의 터널 연장별 승객 이명감 분석 결과

① 분석조건

열차	· EMU-250 열차적용(10량1편성)	주행속도	250 ㎞/h (단독주행)
터널	· 단면 40㎡ (500~4000m 터널연장)	차체 기밀도	τ : 18

② 터널 연장별 이명감 경향

- 국내 철도차량 기술기준에 의거하여 터널 연장별 객차 내 압력변동 기준에 따른 이명감 분석

구 분	분석 결과	비고
1초 기준 (500Pa/1s)		· 1초 기준 만족 · 최대 이명감 연장 : 2500m
3초 기준 (800Pa/3s)		· 3초 기준 만족 · 최대 이명감 연장 : 2000m
10초 기준 (1000Pa/10s)		· 10초 기준 만족 · 최대 이명감 연장 : 2000m
60초 기준 (2000Pa/60s)		· 60초 기준 만족 · 최대 이명감 연장 : 4000m · 터널연장이 길어질수록 60초 압력변동 증가

※ 단선터널/단독주행 시, 객차내 승객 이명감 기준 만족(터널연장 500~4000m 범위)

○ 결 론 : 국내 단선터널에서, 터널 연장에 따른 EMU-250 운행에 대하여 승객 이명감 문제는 없음.

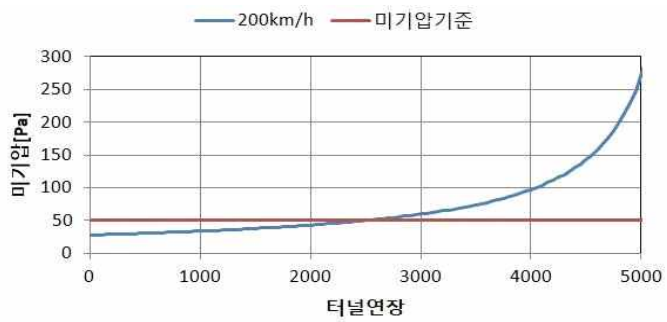
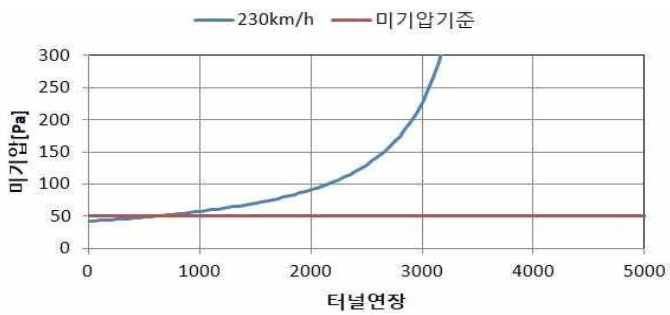
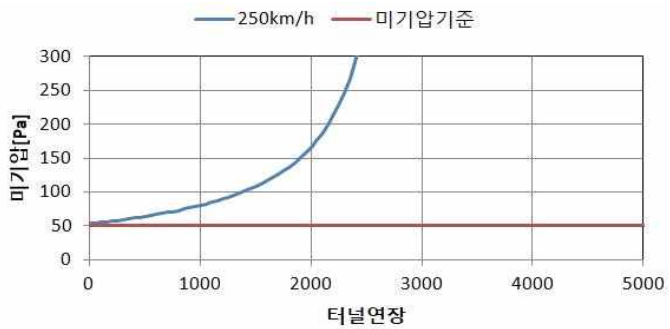
(사) 국내 단선터널의 터널 연장별 미기압파 분석 결과

① 분석조건

구 분	적 용 조 건	
열차	· EMU-250 열차적용	3차원 시뮬레이션을 통한 터널 입구부 압력파 (크기, 기울기) 특성을 고려한 터널연장에 따른 미기압파 영향 검토
터널	· 단면 40㎡, 경사갱문 적용	
분석조건	· 열차속도 200㎞/h, 230㎞/h, 250㎞/h 분석	

② 열차속도별 터널 연장에 따른 미기압파 분석결과

- 터널 연장별 출구부 20m지점의 미기압파 크기를 분석함 (기준 : 터널출구 20m지점 50Pa이하)

구 분	분석 결과	
200㎞/h		· 약 2,500m이상의 터널연장에서 기준을 초과함
230㎞/h		· 약 600m이상의 터널연장에서 기준을 초과함
250㎞/h		· 250㎞/h주행시 전 터널연장 (열차길이 이상일 경우)에서 미기압파 기준을 초과함

○ 결 론 : 국내 단선터널에서는 EMU-250의 운행에 대하여 터널 미기압파 저감 대책을 세워야 함(터널 미기압파 관리기준 수립 필요).

(아) 터널 미기압파 관리기준(안) 제시

○ (미기압파 관리기준(안)) 터널출구 외부로의 미기압파 방출에 따른 주변 환경중심의 관리기준(안)을 다음과 같이 제안함.

- 음향학적 주파수 특성과 측정위치를 규정한 관리기준(안)

① 터널 출구에서 25m 지점 및 선로상부 1.5m에서 Z-보정 음압 레벨(Z-weighting Sound Pressure Level)은 50Pa(128dB)을 초과해서는 안 됨(고막 손상 방지).

② 대상지역에서의 Z-보정 음압 레벨은 다음을 따름.

・터널 입/출구로부터 가장 가까운 주거지(또는 학교나 병원, 축사 등 기타 민감한 건물)에서 20Pa(120dB)를 초과해서는 안 됨.

* 설명 : 일본기준의 경우에 ①항에서 터널 출구에서 20m 지점을 적용하나, 국내 철도변 시설물 환경에서는 25m 지점을 제안함. 사유는, 국내의 경우에 20m 지점은 철도변 펜스 내부에 해당하며, 철도 공용중인 경우에 미기압파 계측을 위하여 진입이 불가함.

○ (설계 시 4단계 미기압파 영향해석 수행) 터널공사 기본(실시)설계 시 터널 미기압파 발생 특성 예측을 수행하여 감소방안을 구축하여야 함.

① 터널 진입 시 압축파 생성

: 터널 입구로부터 내부 100m 또는 200m 지점에서 압축파 특성

② 터널 내 압축파 전파 특성

: 터널벽면 및 궤도 특성에 따른 압축파 전파 특성

③ 터널출구 압축파 방사 특성

: 터널출구 외부 기준위치에서 입체각을 반영한 미기압파의 음압 강도 평가

④ 터널 출구 밖 음향특성 평가

: 주거지 또는 학교나 병원, 축사 등의 특정위치에서 음향 특성

○ 예측 평가에 따른 터널 미기압파 저감 방안 구축

- 철도 설계속도에 대하여 터널 내 수직갱 또는 사갱에 풍도 적용검토, 터널 단면적 증대 검토, 터널 내 저주파 흡음재 적용검토, 궤도특성 변경검토, 터널 미기압파 저감 후드 적용검토 등

(자) 터널 미기압파 관리기준(안) 규정화 방안

○ 터널 미기압파 관리기준 법제화 방안

- 국토교통부 철도설계기준(KDS 47 10 70 터널, 2016) 일부개정

: 철도 미기압파 소음 관리기준을 추가 (2. 계획, 2.1 터널의 계획, (2)내공단면 계획의 ④항을 개정하고 ⑤항과 ⑥항을 추가)

- 현재 고시되어 있는 원안

2.1 터널의 계획
(2) 내공단면 계획
④ 내공단면 계획 시에는 열차의 고속주행에 의하여 터널 내에 발생되는 공기저항 및 공기압 변화와 차량 밀폐도, 승차감 및 미기압파의 영향 등을 고려해야 한다.

- 신규 개정안

2.1 터널의 계획
(2) 내공단면 계획
④ 내공단면 계획 시에는 열차의 고속주행에 의하여 터널 내에 발생되는 공기저항 및 공기압 변화와 차량 밀폐도, 승차감 등을 고려해야 한다.

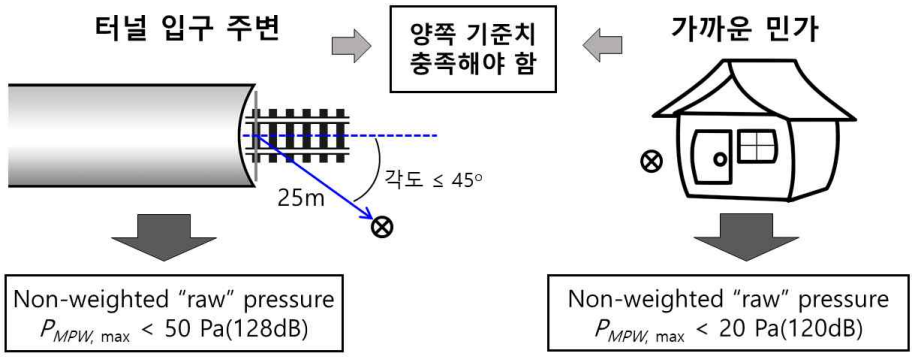
⑤ 내공단면 계획 시 **터널 미기압파 발생 특성 예측을 수행**하여 감소방안을 구축하여야 한다. 예측 평가 시 다음의 관리기준을 만족하여야 한다.

가. 터널 출구에서 25m 지점 및 선로상부 1.5m에서 Z-보정 음압 레벨(SPL)은 50Pa(128dB)을 초과해서는 안 됨(고막손상 피해 예방).

나. 대상지역에서의 Z-보정 음압 레벨은 다음을 따름.

- 터널입출구로부터 가장 가까운 주거지(또는 학교나 병원, 축사 등 기타 민감한 건물)에서 20Pa(120dB)을 초과해서는 안 됨(폭발음과 진동 저감).

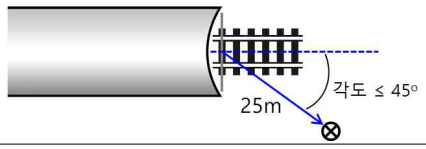
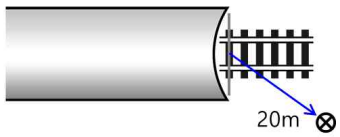
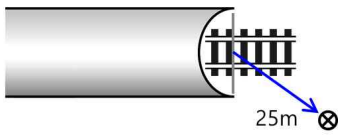
⑥ 터널 미기압파 저감 방안 구축 : 철도 설계속도에 대하여 터널 내 수직갱 또는 사갱에 풍도 적용검토, 터널 단면적 증대검토, 터널 내 저주파 흡음재 적용검토, 궤도특성 변경검토, 터널 미기압파 저감 후드 적용검토 등을 통한 저감 방안을 제시하여야 한다.



✓ 터널 출구 외부 25m 위치에서의 기준치는 폭발음에 의한 청각 손상을 방지하기 위한 기준임. 민가에 대한 기준치는 폭발음과 창문 틀(문틀)의 심각한 진동으로 부터 주민을 보호하기 위한 기준임.

<그림 2.1.6e 국내 터널 미기압파 관리기준(안)>

<표 2.1.4e 터널 미기압파 관리기준의 기준위치 비교>

구분	기준위치 비교	비 고
한국		• 25m 기준위치: 철도변 안전펜스 외부에서 미기압파 측정 가능하여 철도 공용중 계측 가능 • 20m 기준위치: 일본은 선로 시공기면폭이 작아 안전펜스 외부 위치임
일본		
독일		

○ 터널 미기압파 관리기준치 완화하여 반영함

- 터널 출구에서 20m 기준위치를 25m 기준위치로 변경하면, 터널 미기압파 기준치를 일본보다 20% 완화한 것과 같은 효과임. 즉, 터널 출구에서 25m 기준위치에서는 50Pa 기준치가 되고, 20m 기준위치에서는 60Pa 기준치가 됨.
- 한국과 일본은 궤도 시공기면폭이 다르므로, 우리나라의 안전펜스 설치위치를 반영하여 25m 기준위치가 타당함.

(차) 터널 미기압파 관리기준 규정화의 기대효과

○ 터널 입/출구 주변 민가의 폭발음의 소음·진동 관련 민원 저감

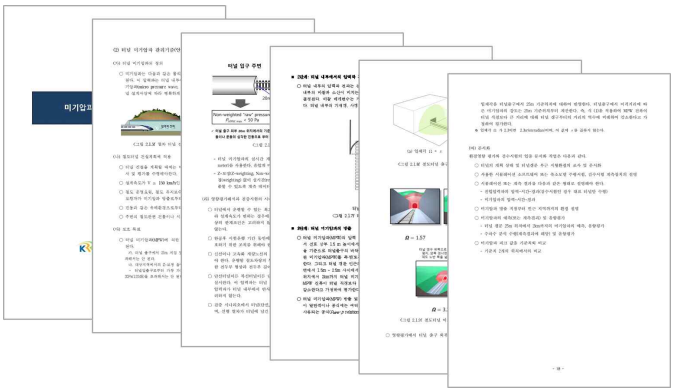
○ 터널 진입 시 감속이 없어지므로 열차 평균속도 상승, 소요시간 단축으로 고객 만족도 향상

○ 시간대별로 "주요 역 정차의 논스톱 운행" 가능하여 철도 서비스 품질 향상(사례 : SRT 고속철도, 서울 지하철 9호선)

(2) 터널 미기압파 관리기준(안) 절차서 개발

○ 터널 미기압파 관리기준(안) 절차서의 수록 내용

- 철도터널 건설계획에서의 적용범위
- 보호목표(관리 기준치)
- 영향 평가해석과 검증시험의 시나리오
- 검증 보고서 : 터널 설계 시 영향평가와 완공 후 검수시험에 대한 공인성적서
- 문서화 내용 : 환경영향 평가와 검수시험의 입증 문서화 작업

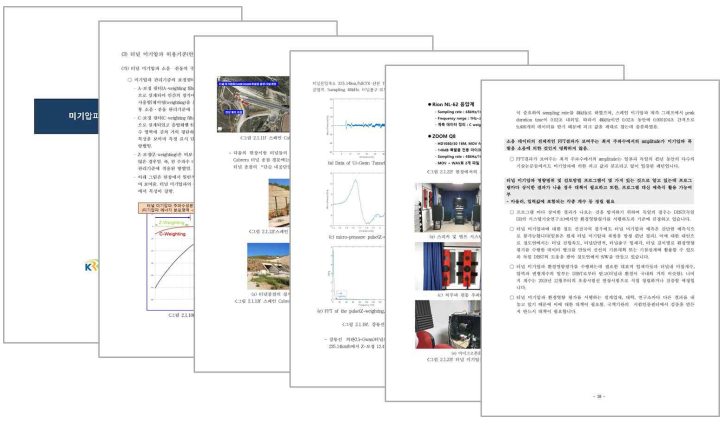


<그림 2.1.7e 터널 미기압파 관리기준(안) 절차서 개발>

(3) 터널 미기압파 관리기준(안) 해설서 마련

○ 터널 미기압파 관리기준(안) 해설서의 수록 내용

- 터널 미기압파 소음 · 진동의 주파수대역과 보정필터 설명
- 국내외 현장시험을 통한 터널 미기압파의 주파수 특성 설명
- 국외 터널 미기압파 관리기준 특성 비교설명 및 평가
- 터널 미기압파 폭발음 동영상 설명



<그림 2.1.8e 터널 미기압파 관리기준(안) 해설서>

(4) 터널 미기압파 폭발음에 대한 주민 민감도 테스트 챔버 개발

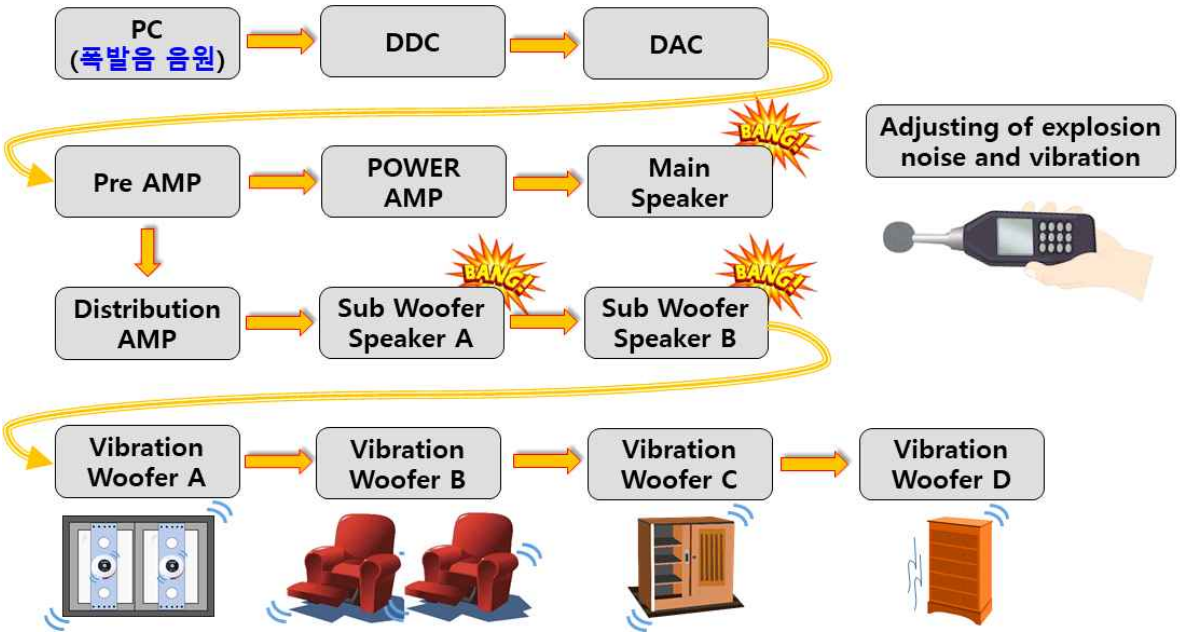
○ 터널 미기압파 관리기준치 검증을 위하여 주민들이 느끼는 터널 미기압파에 대한 민감도 테스트 챔버와 테스트 방법을 구축하였음.

○ 터널 미기압파 폭발음이 발생하는 해외 현장에서 초저주파 대역까지의 고 데시벨 전용 녹음장치로 녹음 및 녹화하여, 미기압파 민감도 테스트 챔버에서 주민 샘플군에 대하여 민감도 테스트를 수행할 수 있음.

○ 미기압파 민감도 테스트 챔버는 미기압파 폭발음 재생장치, 저주파 진동 재생장치, 의자(쇼파), 기본가구로 구성되며, 의자와 가구 내부에는 저주파 진동 재생장치 모듈이 장착되어 현장에서 녹음된 미기압파의 주파수 특성 및 강도에 따라 반응함.



<그림 2.1.9e 터널 미기압파 폭발음 주민 민감도 테스트 챔버 사진>



<그림 2.1.10e 터널 미기압파 폭발음 주민 민감도 테스트 장비시스템 구성도>

● Rion NL-62 음압계

- Sampling rate : 48kHz/16bit
- Frequency range : 1Hz~20kHz
- 계측 데이터 정리 : C weighting dB를 Pa로 변환

● ZOOM Q8

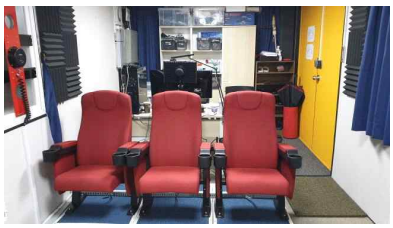
- HD1080/30 16M, MOV format 촬영
- 140dB 폭발음 전용 마이크로폰 적용
- Sampling rate : 48kHz/16bit, WAV format
- MOV + WAV로 2개 파일 생성



<그림 2.1.11e 현장에서의 초저주파 고 데시벨 전용 녹음 및 녹화장비 구성>



(a) 스피커 및 앰프 시스템



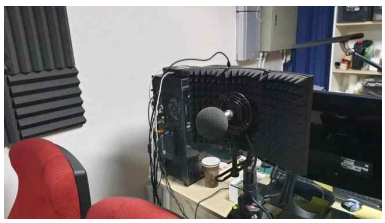
(b) 저주파 진동의자/진동가구



(c) 저주파 진동우퍼(좌측 창문)



(d) 저주파 진동우퍼(우측 창문)



(e) 마이크로폰(RION NL-62)



(f) 음압계(RION NL-62)

<그림 2.1.12e 터널 미기압파 폭발음 주민 민감도 테스트 챔버의 장비 구성>

2019. . .

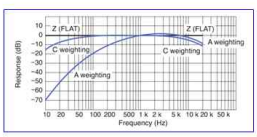
미기압파 폭발음에 대한 주민 민감도 평가

소속: 부서명: 핸드폰 번호: 성함: (사인)

※ C-weighting dB(C)로 평가 수행 – 폭발음을 스피커로 재생 시에 스피커의 특성이 C-weighting 되어 있음

미기압파 폭발음 평가 값		매우 놀람	상당히 불쾌함	불쾌함	보통	편안함	매우 편안함
70dB(C)	민가지역						
115dB(C)	청각손상 방지						

※ C-보정(C-weighting)
사람의 귀의 반응은 소리의 레벨에 따라 달라짐. 100 dB이상의 고음에 대하여, 청각 반응은 더 평탄한 반응을 갖는다. A-보정(A-weighting) 응답을 대부분의 적용에 대하여 사용하지만 C-보정도 많은 음압계에서 사용한다. C-보정은 주로 폭발음과 같은 피크 값 계측에서 사용되며, 저주파 소음의 영향이 문제가 되는 공영장 소음측정에도 사용된다. C-보정 측정은 dB(C)로 표기한다.



<그림 2.1.13e 터널 미기압파 폭발음 주민 민감도 평가 시트>

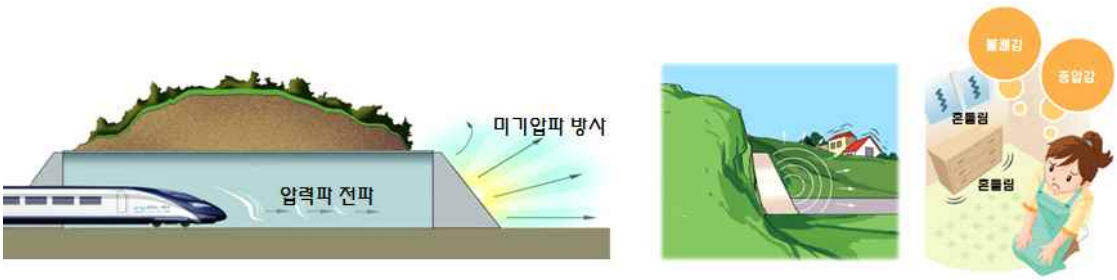
바. 터널 미기압파 예측 역해석 프로그램(S/W) 개발

(1) 터널 미기압파 이론

○ 본 절에서는 터널출구 미기압파 환경영향평가 프로그램(s/w, MPW EEE Program)을 제작하는데 적용한 이론적 배경에 대하여 설명한다.

(가) 터널 미기압파 개요

○ 정의 : 고속열차의 터널 진입 시 피스톤 효과와 같이 터널 내 공기가 압축되면서 압축파가 발생하여 터널 출구로 음속(시속 약 1,200km/h)으로 전파되는데, 이 압축파의 일부는 충격파의 형태로 터널 출구에서 외부로 방사됨. 이를 미기압파(micro-pressure wave, MPW)라고 한다.



<그림 2.1.1f 고속열차 터널 진입 시 압력파 발생 및 터널 출구에서의 미기압파 방사>

○ **영향** : 저주파의 충격파인 미기압파가 터널 출구에서 방출되면 민가의 창문 떨림이 발생하거나 심각한 경우 충격성 소음(폭발음)이 발생하여 터널 주변 주거환경에 영향을 미치게 되므로 민원 발생 요인이 되며, 이를 방지하기 위해 터널 진입 시 일부 감속 운행하거나 터널 단면적을 확장하여야 하는 경제적 시간적 불리함이 발생한다.

○ 터널 미기압파의 강도($P_{\max}$)는 열차단면적과 터널단면적의 비(β)에 비례하며, 터널 연장이 짧은 경우에는 터널에 진입하는 열차속도(V)의 3승에 비례하여 증가하고, 터널 연장이 매우 긴 경우에는 5승~7승까지 비례하여 증가한다.

$$P_{\max} \propto \beta \times V^3$$

○ 터널 미기압파의 발생과 강도는 터널입구의 형상, 터널출구 주변의 지형환경, 터널 단면의 형상, 궤도의 종류, 터널길이에 따라 변화된다.

○ 터널 미기압파는 저주파 충격성 소음·진동으로 진폭과 파장이 매우 길어 선로변의 방음벽을 타고 넘어가기 때문에 방음벽으로 차폐가 불가능하며 1km ~ 3km까지 방사해 나간다. 민가에 충격음(폭발음)과 동시에 민가의 가구나 창틀에 심한 진동을 야기한다. 반면에 열차운행 소음은 방음벽 안쪽에서 청음 시에 매우 크게 들리나 진폭과 파장이 짧아서 방음벽으로 대부분 차단이 된다.

(나) 국내 철도터널의 터널 미기압파 현황

○ 국내 현황 및 외국 사례 : 기존의 경우, 경부고속철도, 호남고속철도, 강릉선 등은 진입속도 대비 터널 내공단면적이 커 '터널 미기압파' 문제 발생 없다.

<표 2.1.1f 각국의 고속철도 터널 단면적과 운행속도(UIC 터널 단면적 정의 적용)>

구분	우리나라			일본	독일	중국
	경부고속	호남고속	강릉선 중앙선			
터널단면적 (㎡)	107 (복선)	96.7 (복선)	68 (복선)	61~66 (복선)	60.5(단선) 92.0(복선)	48.6(단선)
운행속도 (㎞/h)	300	3`00	250	245 ~ 260	250 ~ 300 300(복선)	200
관리기준	없음			있음	있음	있음

○ 향후 건설예정(완공예정) 터널 : 앞으로 건설될 철도 터널들은 콘크리트 궤도(자갈 궤도보다 미기압파 영향이 큼) 적용 및 터널 단면축소와 고속화 추세에 따라 대책마련이 시급하다.

○ 철도시설공단에서 운행속도 250km/h이하 신규철도 단선터널(단면적 : 39.97m^2)과 300 km/h 운행 신규철도 단선터널(단면적 : 56.7m^2)을 최소 단면적으로 사양 결정하여 설계에 반영 중이다(철도시설공단에서 철도터널 건설비 최소화 시행).

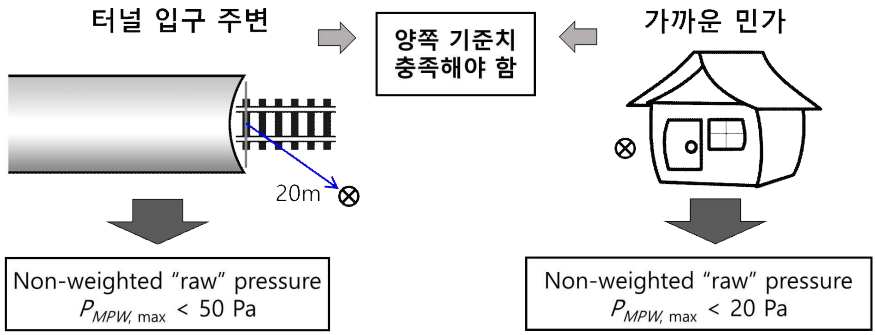
<표 2.1.2f 국내 고속화철도의 단선터널 단면적(UIC 터널 단면적 정의 적용)>

운행속도	신선	터널 내공단면적	터널 개소	후드 적용 필요 개소	예상 완공년도
250㎞/h	충북선 (청주-제천)	약 50㎡	50	60	`24
	중부내륙선 (여주-충주)	38.17㎡	8	14	`20
	동해선 (포항-삼척)	39.97㎡	37	59	`24
	경전선 (보성-임성리)	39.97㎡	19	30	`24
	중부내륙선 (충주-문경)	38.17㎡	9	16	`21
	동서고속철도 (춘천-속초)	38.62㎡	8	14	`27
300㎞/h (250㎞/h)	남부내륙선 (김천-거제)	56.7㎡ (40㎡)	58	70	`24 이후
합 계			189	263	-

(다) 국내외 터널 미기압파 관리기준

○ (일본) 1975년 신칸센 개통과 더불어, 터널 미기압파 폭발음 발생에 기인하여 미기압파 관리기준을 최초로 정립하였다.

* 일본 미기압파 허용기준 : 터널출구 20m에 거리에서 50Pa(128dB) 이하 유지, 민가에서는 20Pa(120dB) 이하 유지

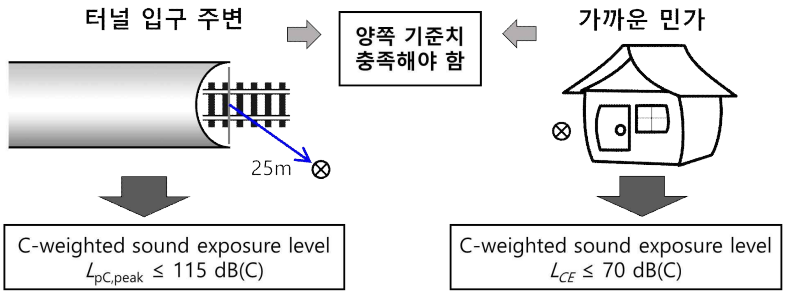


✓ 터널 출구 외부 20m 위치에서의 기준치는 가청 폭발음을 방지하기 위한 기준임. 민가에 대한 기준치는 창문 틀이나 문틀의 심각한 진동으로 부터 주민을 보호하기 위한 기준임.

<그림 2.1.2f 일본 관리기준>

○ (유럽-독일) 2005년 Nuremberg-Ingolstadt 고속신선에서 터널 미기압파 폭발음 발생에 기인하여 2012년 미기압파 관리기준을 정립하였으며 음향학적인 C-보정(C-weighting) 기준을 기반으로 한다.

* 독일 미기압파 허용기준 : 터널출구 외부 25m 거리에서 LpC,peak = 115 dB(C) 이하 유지(고막 손상 방지), 주거지는 LCE = 70 dB(C), 정원은 85 dB(C) 그리고 공장지역은 90 dB(C) 이하 유지



✓ 터널 출구 외부 25m 위치에서의 C-weighted sound peak level $L_{pC,peak}$ 값이 115 dB(C) 이하 기준치는 터널 주변 사람의 청각 손상을 방지하기 위한 기준임. 민가에 대한 기준치는 창문 틀이나 문틀의 심각한 진동으로 부터 주민을 보호하기 위한 기준임.

<그림 2.1.3f 독일 관리기준>

* A-보정(A-weighting)은 여러 주파수의 소리 크기에 대한 일반적인 인간의 인식을 반영하지만 C-보정(C-weighting)은 충동적이고 낮은 주파수의 소리를 평가하는데 더 자주 사용되기 때문에 미기압파(MPW)에 더 적합하다.

○ (국내) 철도설계기준(KDS 47 10 70 터널, 2016)의 2. 계획, 2.1 터널의 계획, (2)내공단면 계획에 다음과 같이 4항으로 “미기압파의 영향을 고려해야 한다”라고 선언적으로 명시되어 있으나 관리 기준치에 대한 언급이 없다.

* 4항 내용 : 내공단면 계획 시에는 열차의 고속주행에 의하여 터널 내에 발생되는 공기저항 및 공기압 변화와 차량 밀폐도, 승차감 및 미기압파의 영향 등을 고려해야 한다.

* 일본의 기준과 유사한 “가장 가까운 관찰자(민가)”의 위치에서 20Pa(120dB) 한계가 적용되며, 가장 가까운 관찰자는 건물이나 고속도로 또는 일반인 출입이 가능한 지점을 의미한다(국내 기준이나 지침에 명문화 없음).

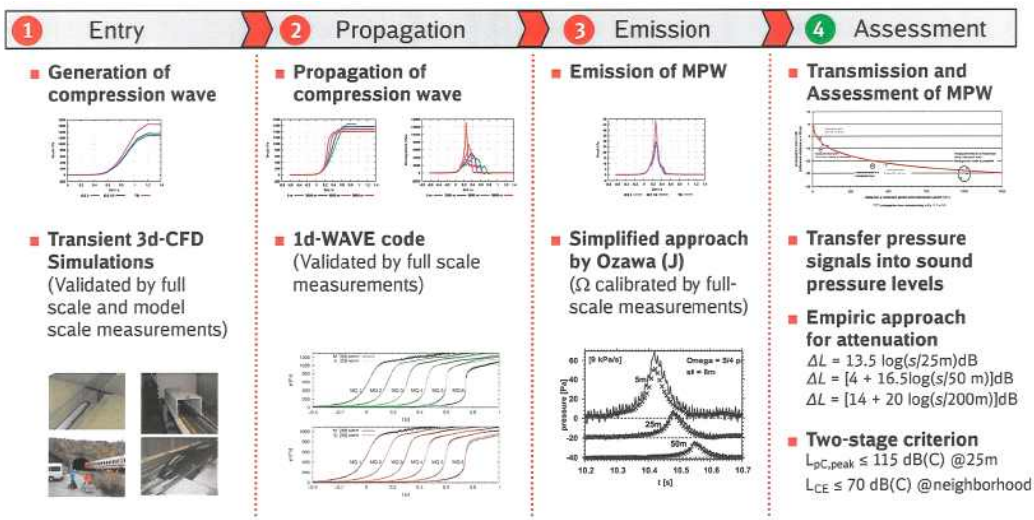
(라) 터널 미기압파 해석기법에 대한 규정

○ 독일에서는 터널 미기압파 환경영향평가(prediction and assessment)에 대한 해석기법 규정(regulation)을 가지고 있으며, 이 규정은 독일 철도환경위원회에서 승인되었다(2011년). 독일규정인 DB Ril853 module 2001A01[Stand 01.03.2011]은 콘크리트궤도를 적용하는 철도터널에 대한 미기압파 전산해석 방법에 대한 규정이다.

○ 본 프로그램의 전산해석은 독일 규정인 DB Ril853 module 2001A01의 해석절차를 준수하여 DBST(DB Systemtechnik, 독일철도공사 시스템연구소)에 의하여 수행되었다. 따라서 신규 터널설계에서 사전 현장시험 수행 없이, 초기 설계단계에서 터널 미기압파에 대한 환경영향평가와 저감 대책을 강구 할 수 있게 되었다.

(마) 터널 미기압파 4단계 해석기법

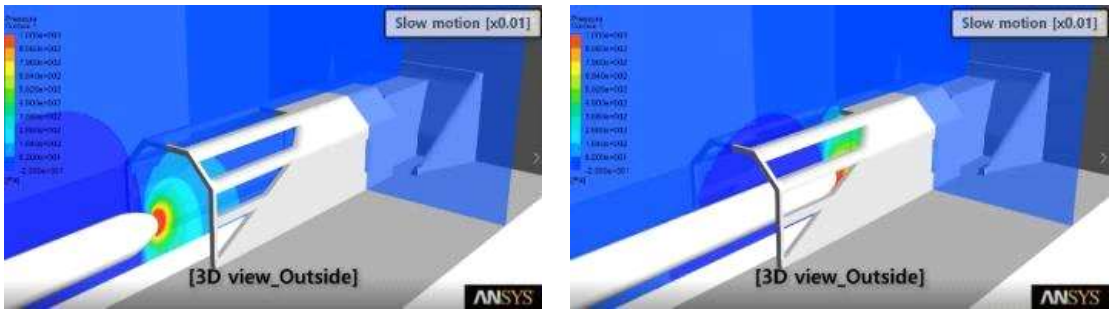
○ 다음은 본 “터널 미기압파 환경영향 프로그램”에 적용되어있는 독일 DBST에서 수행한 CFD 전산해석 방법(그림 2.1.4f)을 요약하여 정리하였다[DBST, 2019].



<그림 2.1.4f 터널 미기압파 평가방법의 절차>

○ **1단계 : 압력파 발생 단계에 대한 평가방법**

터널 진입 시 최대 압력구배(또는 시간에 따른 압력구배)를 예측하기 위해 사용 가능한 평가방법이다. 터널 진입 시의 압력파 생성은 3차원적 현상이며, 1차원 방식만으로는 정확하게 분석할 수 없다. 일반적으로 3D CFD 시뮬레이션 프로그램을 활용하여 분석한다. 본 프로그램에서는 슬라이딩 매쉬(sliding mesh)를 적용하여 비정상 3차원 CFD 전산해석으로 수행되었다[Schlämmer, 2008]. 그림 2.1.5f는 전산해석 결과의 사례를 나타내었다.



(a) Pressure field of time step A (b) Pressure field of time step B

<그림 2.1.5f 터널 갱문에 진입하는 비정상 3차원 CFD 전산해석 사례>

○ **2단계 : 파동 전파 단계 분석을 위한 평가방법**

압력파 파동 전파는 근본적으로 1차원적 현상이며, 일반적으로 1차원적 방법을 사용하여 분석한다. 전체 시간에 따른 압력구배가 필요한 경우나, 이를 간단히 추정할 수 있는 일정한 마찰을 고려해야하는 경우에는 현장시험 등으로 검증된 1차원적 소프트웨어 패키지를 사용하여야 한다. 일부 1차원적 소프트웨어 패키지에는 비정상 마찰의 영향을 예측할 수 있는 기능이 있으나 실물 크기의 터널에서 압력파 전달과 관련된 입력 변수가 입증되어야 한다.

터널을 통한 압축파의 전파는 1차원 전산해석 방법으로 수행되었는데 1차원 Euler 방정식에 비정상 마찰계수 ε_{us}와 준-정상 마찰계수 λ를 포함하여 해석하였다[Adami, 2008].

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u^2+p)}{\partial x}=-\frac{\lambda\rho u^2}{2d_h}-\varepsilon_{us}\frac{16\rho\nu}{d_h^2}\int_0^t W(t-\tau)\frac{\partial u(\tau)}{\partial\tau}d\tau \qquad (1)$$

○ **3단계 : MPW 방출 단계 분석을 위한 평가방법**

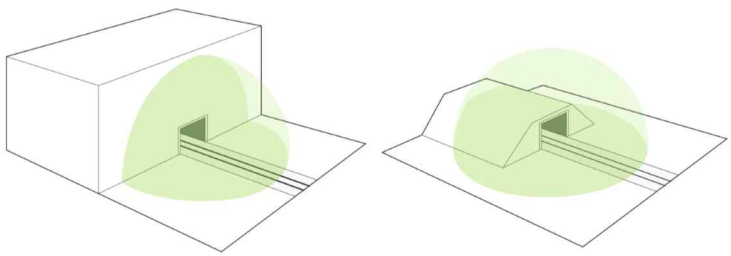
터널 출구에서 MPW 방출 및 전달 단계의 분석을 위해서는 간단한 공식을 사용하는 것이 일반적이나 공식에는 여러 가지가 있음. MPW 방출 및 전달을 계산하는데 가장 많이 사용되는 공식(P_{MPW} - p relation)은 식 (2)와 같다[Yamamoto' s model, 1977].

$$P_{MPW}(t)=\frac{2A_T}{\Omega cs}\frac{\partial p}{\partial t}([t]) \qquad (2)$$

- 식 (2)는 낮은 주파수의 MPW 방출과 초기 평가에 적합하며, 본 프로그램에서는 유효성을 전체 주파수 범위까지 확장하기 위한 방법(Ozawa’s model, 1997)을 식 (3)과 같이 사용하였다[Ozawa, 1976, Hieke, 2011].

$$P_{MPW}(t)=\frac{A_T}{\Omega cs}\cdot\left[\frac{\partial}{\partial t}p(t_{ret})+\frac{1}{4T_1\sqrt{\pi}}\cdot\int_0^{t_{ret}}e^{\frac{-(t_{ret}-\tau)^2}{4T_1^2}}\frac{\partial}{\partial t}p(\tau)d\tau+\frac{11}{50T_2^2\sqrt{\pi}}\cdot\int_0^{t_{ret}}(t_{ret}-\tau)e^{\frac{-(t_{ret}-\tau)^2}{4T_2^2}}\frac{\partial}{\partial t}p(\tau)d\tau\right] \quad (3)$$

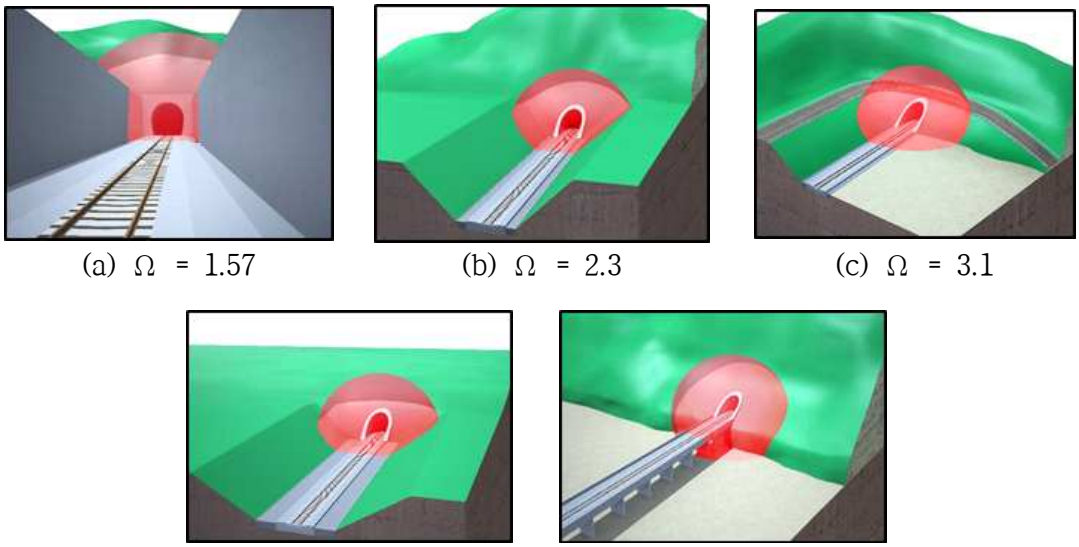
- 여기서 P_{MPW}는 미기압파 강도, p는 터널내 압력변동량, A_T 는 터널내공단면적, s 는 터널 출구 중심에서 관찰자까지의 거리, $t_{ret} = t - s/c$, $T_1 = 1.4a/c$, $T_2 = a/c$, a는 터널 등가 반지름, Ω는 터널출구 외부 주변 지형환경에 대한 입체각, c는 음속, $\partial p/\partial t$는 압축파의 압력구배를 나타낸다.
- 입체각은 터널 출구 외부 지형환경을 묘사하는 경험상수로 간주된다. 입체각의 단위는 steradian(symbol: sr)이며 무차원 상수이다.
- 터널 출구에서 방출되는 미기압파가 모아지거나 확산되는 MPW의 방향성 또한 고려되어야 하며 이러한 문제는 특정 터널 갱구와 MPW 측정위치 주변의 환경에 알맞은 입체각 Ω의 값을 결정하여 처리된다.
  - 간단한 지형에 대한 입체각 Ω의 이론적인 값은 그림 2.1.6f과 같이 π 또는 2π의 값을 갖지만, 실제 미기압파 계측 현장실험에서는 같은 터널 출구에 대해서도 계측 위치에 따라 입체각의 값은 폭넓게 변화된다.



(a) 입체각 $\Omega = \pi$ (b) 입체각 $\Omega \fallingdotseq 2\pi$

<그림 2.1.6f 터널 출구형상에 따른 입체각[Federal Railroad Administration, 2015]>

  - 현장실험으로 입체각 Ω값을 구하는 방법이 현재로서는 최선이다(입체각 Ω는 터널 갱구의 갱문 형상이 아니고, 갱구 앞의 지형조건(양쪽 사면 등)임). 터널 출구에서 MPW가 방출될 수 있는 입체 각도이다(그림 2.1.7f 참조요망).
  - 실제 철도터널 건설 시에 많이 형성되는 지형에 따른 입체각을 그림 2.1.7f에 나타내었으며, 본 프로그램에서는 이 형상을 보고 입체각을 선택할 수 있도록 하였다(독일 DBST의 Ω값 현장시험 결과 반영함)[Hieke, 2011].



(a) Ω = 1.57 (b) Ω = 2.3 (c) Ω = 3.1

(d) Ω = 3.2 (e) Ω = 6.4

<그림 2.1.7f 환경영향평가 프로그램에 사용된 터널 출구형상에 따른 입체각
(Copyright KRRI, Dong Hyeon Kim)[DBST, 2019]>

○ **4단계 : MPW 전달 단계 분석을 위한 평가방법**

MPW 진폭이 터널 직경보다 큰 거리에 대해 터널 갱구부터의 거리의 역수에 비례하여 감소한다고 가정한다.

갱구면 중심에서 거리(s)에 따라 MPW 전파손실 ΔL, 즉 거리에 따른 진폭의 감소를 데시벨(dB)로 계산하기 위한 현장에서 경험적으로 입증된 다음과 같은 공식을 활용한다. [DBST, 2019, Gerbig, 2013]

$$\begin{aligned} \Delta L &= 13.5 \log(s / 25\ \text{m})\ \text{dB} && \text{for } 10\ \text{m} \le s \le 50\ \text{m} \\ \Delta L &= [4 + 16.5 \log(s / 50\ \text{m})]\ \text{dB} && \text{for } 50\ \text{m} \le s \le 200\ \text{m} \\ \Delta L &= [14 + 20 \log(s / 200\ \text{m})]\ \text{dB} && \text{for } 200\ \text{m} < s \end{aligned} \quad (4)$$

(바) 전산해석 프로그램의 성능검증

○ **1단계** : 압력파 발생 단계에 대한 평가방법은, 진입 압축파의 3차원 비정상 CFD 전산해석 결과와 독일 기존 철도 터널들에 대한 풀-스케일 현장시험 결과들과 영국 Derby에서의 축소모델 주행시험 결과들과 면밀하게 비교평가 하였다. 더욱이 유럽 AeroTRAIN 프로젝트를 통하여 여러가지 3차원 해석 툴들과 여러 해석 툴 사용자들 간의 교차 체크를 통하여 프로그램의 신뢰성이 검증되었다[AeroTRAIN report, 2012].

○ **2단계** : 파동 전파 단계 분석을 위한 평가방법은, 독일 Euerwang tunnel의 2006년도의 완공 검수시험에서의 풀-스케일 현장시험으로 면밀하게 검증되었다. 이 현장시험에서 터널 콘크리트 라이닝과 콘크리트 궤도의 마찰계수의 조정으로 해석결과와 매우 잘 일치함을 보였다[Adami, 2008]. 본 프로그램에서 적용한 터널 콘크리트 라이닝과 콘크리트

궤도에 대한 마찰계수의 조정 값은 독일 신선 터널들에서의 파동 전파를 정확히 예측함을 현장시험들로 검증하였다[Adami, 2008, DBST, 2019].

○ **3단계** : MPW 방출 단계 분석을 위한 평가방법은 풀-스케일 현장시험으로 검증하였다[Hieke, 2011]. 미기압파 방사의 입체각과 방향성은 현재 적용한 모델이 미기압파 방사 시나리오의 범위에 대하여 타당한 것으로 조사되었다.

○ 최근의 현장시험 수행에서, 독일 Erfurt와 Halle/Leipzig 구간의 독일 고속철도 신선에서 터널 단면적 60m^{2}의 단선터널들에서 본 전산해석 방법의 정확성을 확인하였다[Hieke, 2016].

(사) 전산해석의 입력조건

① 터널에 대한 입력조건

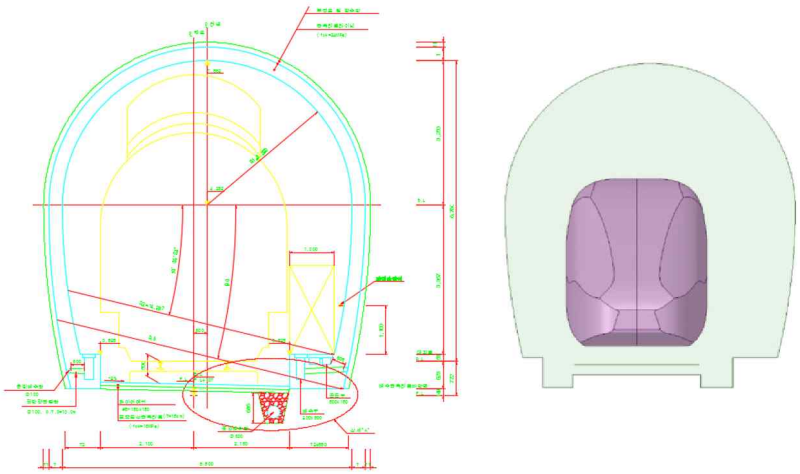
○ 비정상 3차원 전산해석에서 터널 내부는 기재갱이나 공동구가 없으며 직선 궤도를 적용하였다(그림 2.1.8f ~ 그림 2.1.10f). 터널단면도에 EMU250 고속열차를 적용한 터널의 단면도는 그림 2.1.8f에서 확인할 수 있다.

○ 터널 갱문은 해석 케이스에 따라 33.7° 경사갱문과 45° 경사갱문을 적용하였으며 표 2.1.3f에 정리하여 나타내었다. 터널 압축파 생성에 대한 전산해석 CFD 모델은 그림 2.1.10f에 나타내었다.

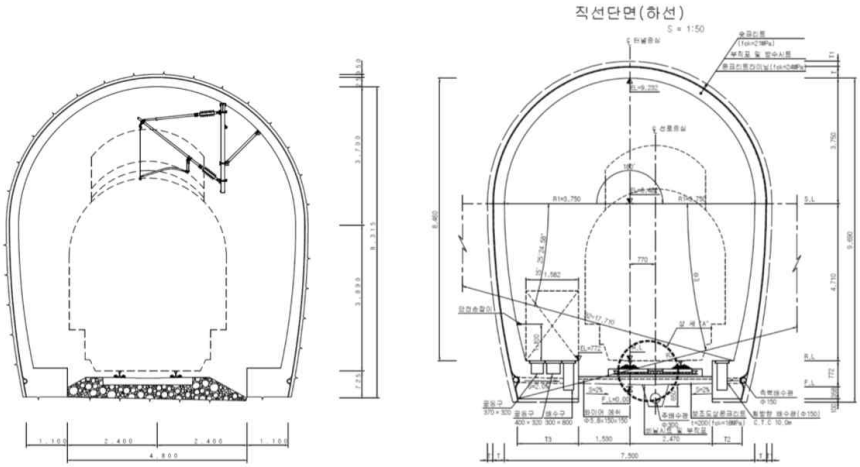
<표 2.1.3f 국내 고속화철도의 단선터널 단면적, 경사갱문 각도, 운행조건>

구분	단선터널 A형	단선터널 B형	단선터널 C형
터널단면적1(㎡)	39.97	50.30	56.70
터널 입/출구 경사갱문 각도	33.7°	45°	45°
운행속도(㎞/h)	200, 250	200, 250	250, 300
운행열차	EMU250, KTX산천	EMU250, KTX산천	EMU250, KTX산천
차량유효단면적(㎡)	EMU250(10.89m^2), KTX산천(10m^2)		
열차편성	8량1편성(148.9m)	8량1편성(148.9m)	8량1편성(148.9m)

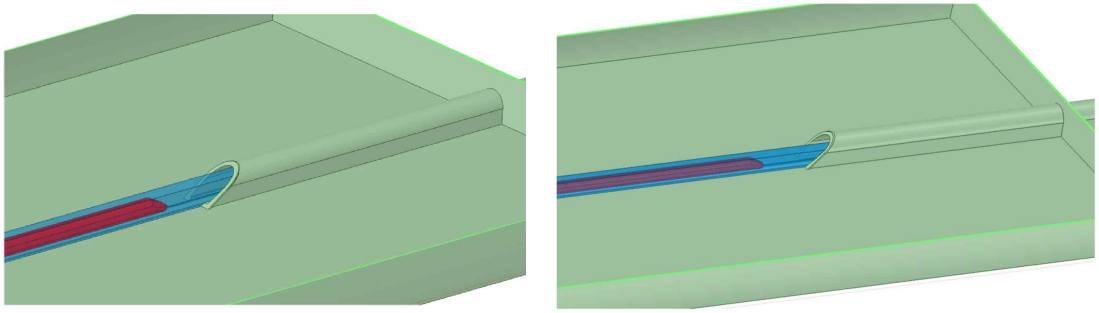
※ 주 1 UIC 터널 단면적 정의 적용함



<그림 2.1.8f 표준 터널단면도(내공단면적 39.97m^2, 좌측)와 EMU250 고속열차를 적용한 터널모델(우측)>



<그림 2.1.9f 표준 터널단면도 ; 내공단면적 50.3m^2(좌측), 56.7m^2(우측)>



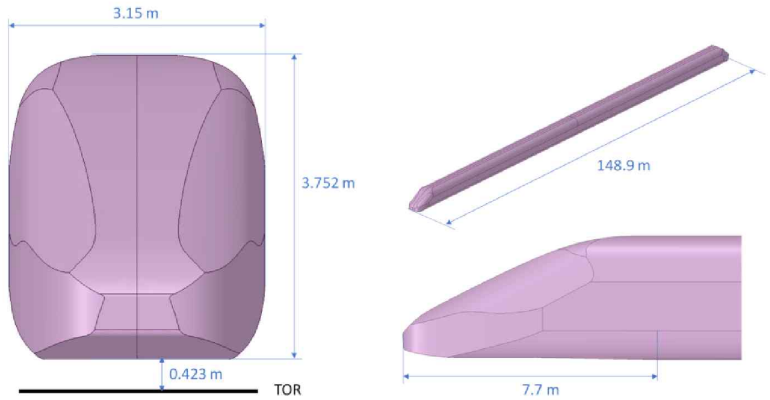
(a) 터널 경사갱문 33.7° (b) 터널 경사갱문 45°

<그림 2.1.10f 터널 갱문을 포함한 3차원 비정상 전산해석 모델 ; 이동격자 전산해석을 위한 슬라이딩 인터페이스(파란색 표면)>

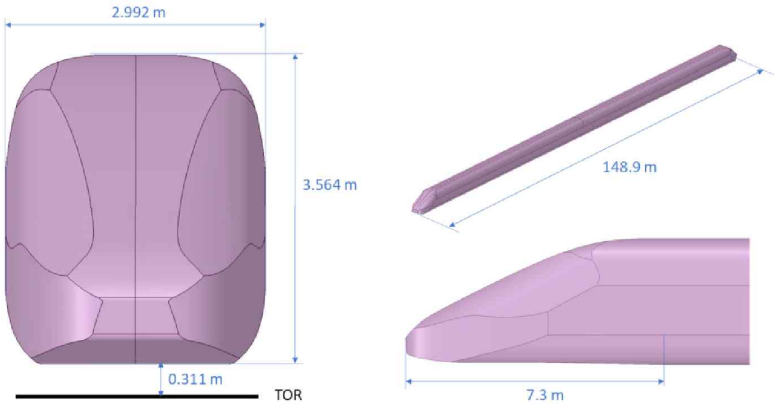
○ 터널 내부에 기재갱이나 공동구가 없으며, 터널 길이방향으로 터널 단면적 변화가 없는 지형 조건은, 콘크리트 라이닝과 슬라브 궤도를 적용한 터널에서 공기역학적으로 가장 최악 조건에 해당된다. 본 프로그램에서는 압력파 전파 모델에 대하여, 비정상 마찰계수 ε_{us} = 2.5와 준-정상 마찰계수 λ = 0.04를 적용하였다[Adami, 2008, DBST, 2019]. 본 프로그램에서 터널연장은 1,000m부터 15,000m까지 터널 연장별로 해석을 수행할 수 있다. 미기압파 방사단계에 대하여, 터널 출구 외부의 지형조건에 해당하는 입체각은 Hieke의 문헌 [Hieke, 2011]에 따라 적용되었다(그림 2.1.7f 참조).

② 고속열차에 대한 입력조건

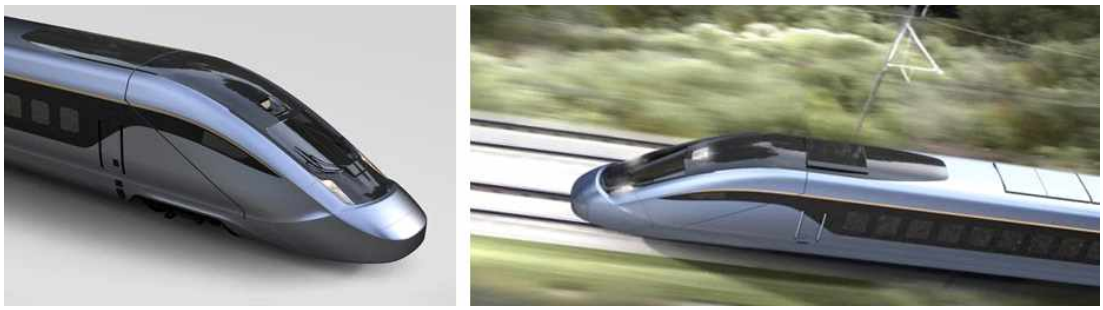
○ EMU250 고속열차와 KTX산천 고속열차에 대한 해석조건은 표 2.1.3f에 정리되어 있으며, 터널 입구에 정속으로 진입하도록 하였다[DBST, 2019]. EMU250 고속열차는 8량1편성으로 현대 로템에서 제공한 캐드 데이터에서 해석 격자계를 추출 하였으며, KTX산천 고속열차는 캐드 데이터에서 해석 격자계 추출이 불가능하여 EMU250 고속열차의 차량단면적을 KTX산천 고속열차의 차량단면적으로 축소 변환하고, 전두부 길이도 KTX산천의 전두부 길이에 맞추었다. EMU250과 KTX산천의 전두부 단면적 변화의 유선형 형상은 거의 비슷하다. 고속열차 차량의 터널 진입속도는 표 2.1.3f에 정리하였다.



<그림 2.1.11f EMU250 고속열차에 대한 3차원 해석모델>



<그림 2.1.12f KTX산천 고속열차에 대한 3차원 해석모델(EMU-250 scaled)>



(a) EMU250 고속열차



(b) KTX산천 고속열차

<그림 2.1.13f KTX산천 고속열차에 대한 3차원 해석모델(EMU 250 scaled)>

(아) 터널 단면적과 진입속도에 따른 적용방법

○ 본 프로그램은 독일 DBST에서 수행한 시뮬레이션 결과로 도출된 데이터[DBST, 2019]를 기본 자료로 하여, 열차속도 200km/h, 250km/h, 300km/h, 입체각 Ω가 1.57, 2.3, 3.1, 3.2, 6.4와 터널 내공단면적 40m^2 ~ 57m^{2}에 대하여 터널 미기압파의 Non-weighting 값과 C-weighting 값을 보간법(Interpolation)을 사용하여 구하도록 하였다.

○ 본 프로그램은 각각의 열차에 대하여, 터널 진입속도 200km/h ~ 250km/h에서는 터널면적 40.0m^2 ~ 50.3m^{2}의 범위, 진입속도 250km/h에서는 터널면적 40m^2 ~ 50.3m^2 ~ 56.7m^{2}의 범위, 진입속도 250km/h ~ 300km/h에서는 터널면적 56.7m^{2}인 경우에 역해석이 가능하다. 입체각에 대해서는, 일본 관리기준을 적용하는 경우에는 모든 입체각의 범위 내에서 역해석을 할 수 있으며, 독일 관리기준을 적용하는 경우에는 입체각 Ω가 1.57, 2.3, 3.1, 3.2, 6.4인 다섯 가지의 경우에 대하여 역해석이 가능하다. 본 프로그램의 모든 입력조건에 대하여 터널시점과 터널종점이 표 2.1.3f의 경사갱문이 적용된 조건에 대한 결과를 출력한다. 즉, 본 S/W의 모든 환경영향평가 결과는 터널 입/출구가 경사갱문인 조건에 대한 해석결과를 도출해 준다.

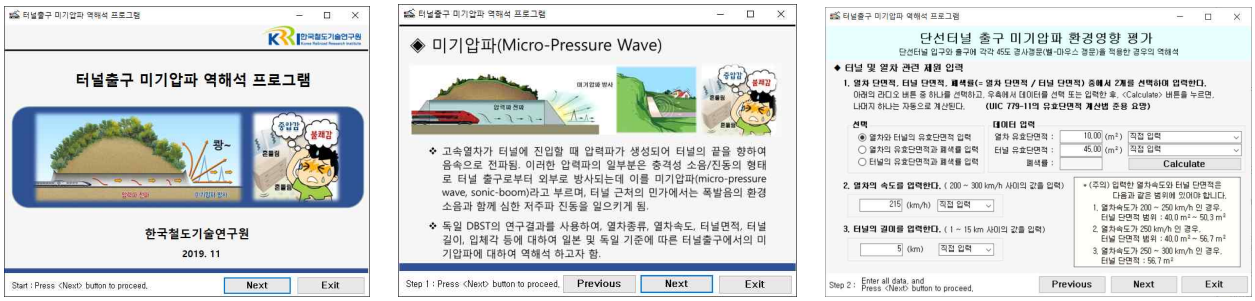
(2) 프로그램 사용 설명서

○ 터널 미기압파 환경영향평가를 수행하고, 평가결과로 터널 미기압파 저감 대책의 적용할 수 있는 소프트웨어를 다음과 같이 개발하였다(프로그램 명: MPW EEE S/W).

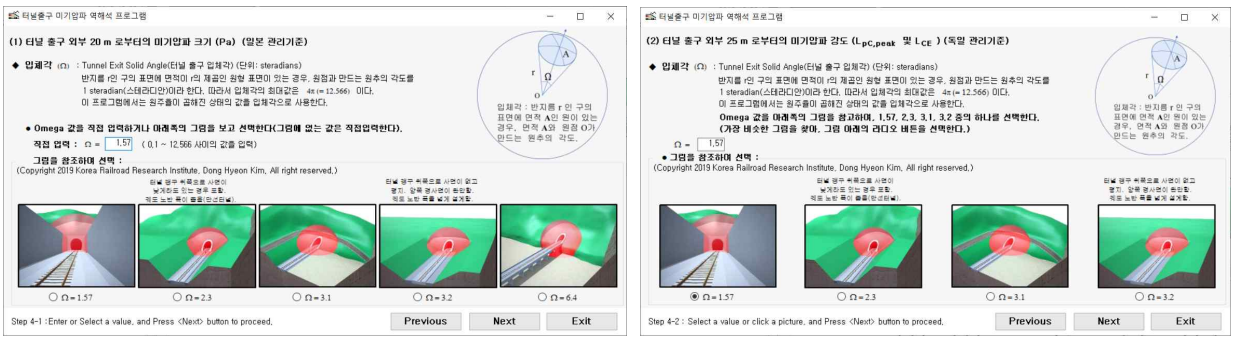
○ 프로그램은 Windows 7 및 10에 설치 가능하다. 경우에 따라서 Net Framework를 설치해야 하는 경우도 있으며, 이런 경우는 인터넷이 연결되어 있어야 자동으로 설치된다.

○ 프로그램 사용설명서에는 PC에서의 프로그램의 설치, 프로그램의 제거, 프로그램의 실행에 대한 사용법을 설명하였다(별첨의 "3차년도 정성적 성과보고서"에 수록함).

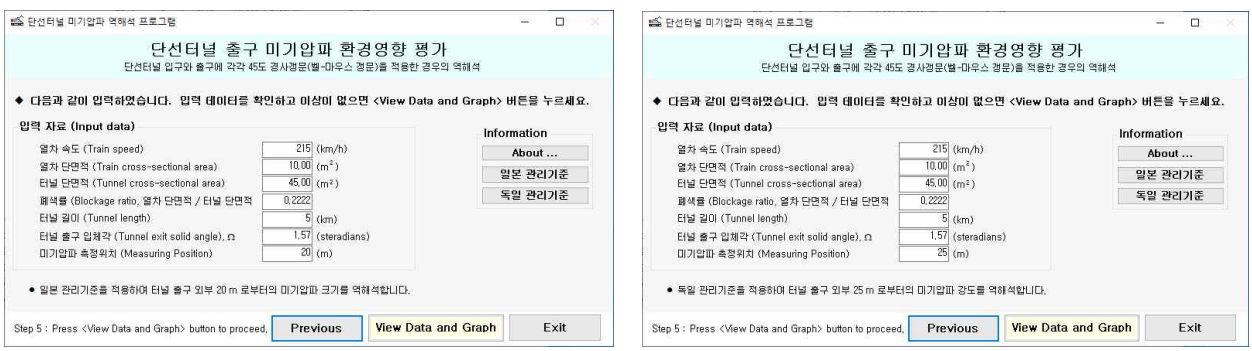
○ 본 프로그램은 우리나라의 터널 미기압파 관리기준(안)에 대한 환경영향평가도 수행할 수 있다.



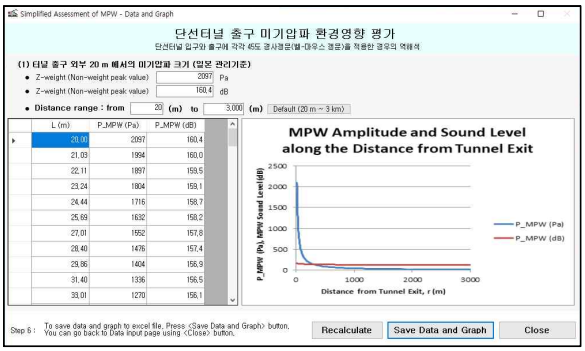
<그림 2.1.14f 소프트웨어 시작화면과 운행조건 입력화면>



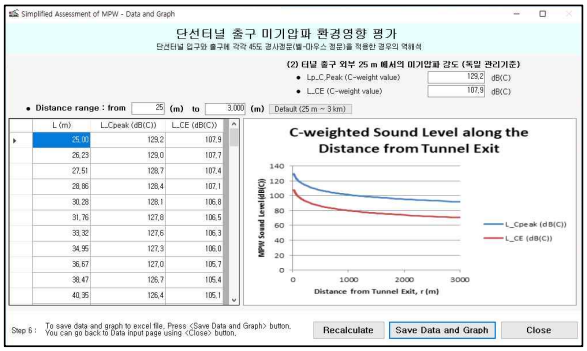
<그림 2.1.15f 일본(좌)과 독일(우) 관리기준 적용방법 선택에 따른 터널출구 입체각 입력화면>



<그림 2.1.16f 일본(좌)과 독일(우) 관리기준 적용방법 선택에 따른 전산해석 실행화면>

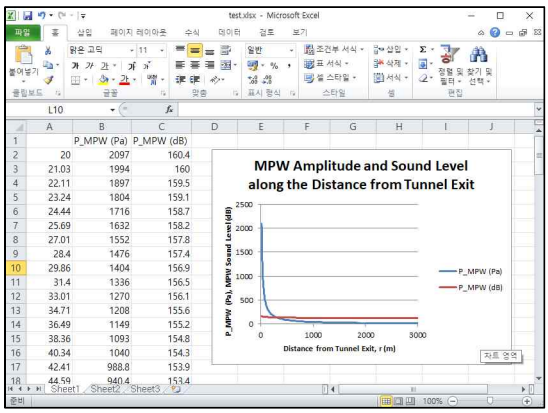


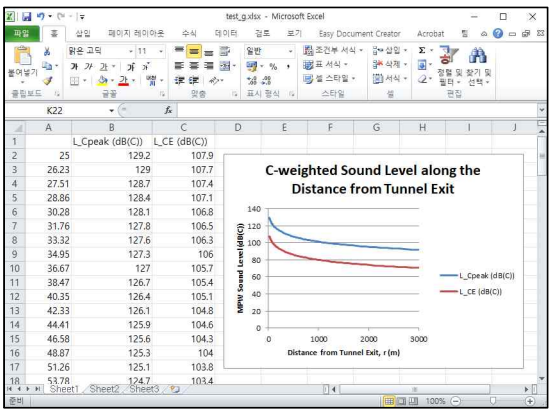
(a) Non-weighting Pa 결과



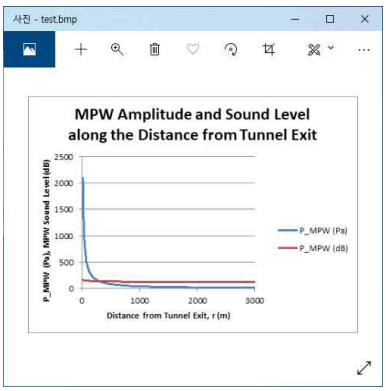
(b) C-weighting dB 결과

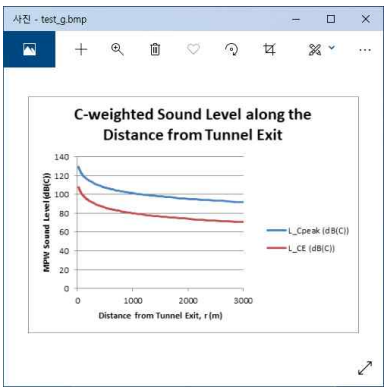
<그림 2.1.17f 일본(좌)과 독일(우) 관리기준 적용방법 선택에 따른 전산해석 결과화면>





<그림 2.1.18f 일본(좌)과 독일(우) 관리기준 적용방법 선택에 따른 결과 엑셀(xlsx)파일>





<그림 2.1.19f 일본(좌)과 독일(우) 관리기준 적용방법 선택에 따른 결과 그림파일>

○ 그림 2.1.17f의 전산해석 결과화면에서 터널 출구로부터 원하는 거리의 위치에서 미기압파의 크기에 대하여 데이터와 그래프를 볼 수 있다.

○ 전산해석 결과 데이터는 엑셀(xlsx)파일로 저장되며(그림 2.1.18f), 그래프는 비트맵(bmp)파일로 저장된다(그림 2.1.19f).

사. 후드 구조체 적용 경제성 평가

(1) 기술 가치 평가에 의한 경제성 분석

(가) 기술 가치 평가 결과

○ 기술 가치 평가를 위한 요인 도출

- 기술의 객관적인 가치평가를 위하여 산업 통상자원부(2014)와 지식경제부(2011년)의 기술가치평가 실무가이드에서 제시한 개별 기술 강도 평가 요인을 사용함.
- 개별 기술 강도는 기술성 10개 평가항목(혁신성, 파급성, 활용성, 전망성, 차별성(독창성), 대체난이도, 모방난이도, 진부화 가능성(기술수명), 권리범위, 권리안정성) 과 사업성 10개 평가항목(수요성, 시장진입성, 생산용이성, 시장점유율 영향, 경제적 수명, 매출성장성, 파생적 매출, 상용화 요구시간, 상용화 소요자본, 영업이익성) 으로 구성됨.

○ 퍼지 포괄평가 기법을 이용한 미기압파 저감 기술에 대한 기술력 평가

- 기술에 대한 기존의 자료가 없거나 부족한 경우에는 항목별로 특정 점수를 부여하거나 동일한 가중치를 적용하는 것은 객관적인 기술 평가에 있어서 상당한 불확실성을 초래하게 됨.
- 따라서, 본 연구에서는 기술가치 평가 시 기존의 방법에서 발생할 수 있는 불확실성을 줄이기 위해 인간의 언어적 표현에 근거하는 퍼지 이론을 적용하고, 이러한 언어 표현에 대한 평가 결과를 계량화 시킬 수 있는 퍼지 포괄 기법을 이용하여 대상 기술에 대한 종합적인 기술력을 계산하였음.

○ 기술 가치 평가 분석 결과

- 상기 기술 가치 평가의 결과에서는 기술성은 높음, 사업성은 아주 높음, 그리고 종합적인 결과에서는 아주 높음과 높음 사이에 있는 것으로 분석됨.
- 이는 유사 기술이 있으나 성능에서 우수하고, 국내뿐만 아니라 해외 진출 가능성을 고려하여 종합적인 기술의 가치가 높은 것으로 해석됨.
- 아래에 현재의 기술력을 구체적으로 파악하고, 경쟁력 향상을 위해서 세부 요인별 평가 결과를 기대 가치 우선순위에 의해 나타내었음.

<표 2.1.1g 세부 요인별 평가 결과 및 기대 가치>

대요인	기술성 요인		사업성 요인	
세부 요인	진부화 가능성(기술수명)	95	수요성	97.77778
	전망성	93.88889	경제적 수명	97.22222
	활용성	93.33333	시장진입 용이성	95
	차별성(독창성)	92.22222	기술의 생산력	92.77778
	권리안정성	90	기술상용화 단계	92.22222

	파급성	89.44444	매출성장성(예상수익)	87.22222
	혁신성	87.77778	시장확보 가능성	86.66667
	대체 난이도	87.77778	이익구조상 우위성	85
	권리범위	85	파생적 매출	84.44444
	모방 난이도	84.44444	가격/원가 우위성	83.88889

- 기술성 요인들 중에서 진부화 가능성, 전망성, 활용성, 차별성, 권리 안정성이 90점 이상으로 나타났고, 파급성, 혁신성, 대체 난이도는 두 번째로 평가됨.
- 권리범위와 모방 난이도는 85점 이하로 가장 낮게 나타났는데, 이는 원천기술에 대한 유사 기술이 존재하기 때문에, 타 업체로부터의 모방가능성이 있고 권리범위가 넓지 않기 때문인 것으로 해석 될 수 있음.
- 사업성 요인으로는 수요성, 경제적 수명, 시장 진입용이성, 기술의 생산력, 기술의 상용화 단계에서 92점 이상으로 나타났고,매출 성장성, 시장확보 가능성이 86점 이상으로 평가됨.
- 이익구조상 우위성, 파생적 매출, 가격/원가 우위성에서는 85점 이하로 나타났으며, 이는 유사 기술이 이미 시장을 선점하고 있어서, 시장 진출 및 판매의 불리함 때문인 것으로 해석될 수 있음.
- 한국철도기술연구원의 미기압파 소음 저감 원천기술은 해외에서는 유사한 기술이 사용되고 있으나, 성능에서 해외기술에 앞서 있으므로, 국내외 해외 기술 이전 및 다양한 판로개척 방안이 필요하며, 또한 경쟁 기술과의 종합적인 기술력 비교를 통해 향후 경쟁력 향상을 위한 실질적인 정책 결정이 필요할 것임.

(2) 경제성 분석

(가) 저감 후드 설치시의 비용절감 효과를 이용한 경제성 평가 결과

○ 터널 내공단면적별 절감액 비교

- 터널 내공 단면적별 건설비를 사용하여 39m^2, 43m^2, 46m^2, 50m^2, 55m^2, 61m^2, 65m^2, 72m^2, 84m^2의 9가지 단면적 건설비를 상호비교하여 후드 설치 전과 후의 터널 건설비 비교를 위한 단면적별 절감액과 절감률을 계산하였음.
- 기존에 진행된 선행연구를 참고하여 후드미설치 터널의 기준 내공단면적은 72m^2로 가정함.
- 터널 단면적별 건설비 데이터의 불확실성으로 인해 절감액(비율)에 대한 단일수치 도출시 절감액(비율)의 불확실성이 존재함.
- 단일 수치인 건설비용에 대한 불확실성을 줄이기 위하여 터널 단면적별 세부 건설비용에 대해 확률적 분포를 적용한 몬테카를로 시뮬레이션을 사용하여 절감액과 절감률의 분포(최소값, 최대값)를 계산하고 평균절감액과 평균절감률을 도출함.
- 먼저 단선터널(일반철도)간 절감액(절감률)을 비교하고 다음으로 복선터널(일반철도)간 절감액(절감률)을 비교하였음.

○ 1km 단선 터널(일반철도)에 대한 경제성 분석 결과 요약

- 10,000번의 반복 계산(모의시행)을 통하여 10,000개의 절감액을 도출하고 각 절감액의 빈도수를 막대그래프 형태로 표시한 히스토그램에서의 분포를 각 비교대상별로 제시하였는데 대표적으로 39m^2-55m^2 단면적 비교결과는 <그림 2.1.1g> 와 같음.
- 경제성 분석 결과, 기준 단선터널 39m^{2}에서의 단면적별 절감 비율 상호비교 값은 최소 8.75%에서 최대 27.83%로, 목표치인 5% 이상을 달성하는 것으로 나타났음.

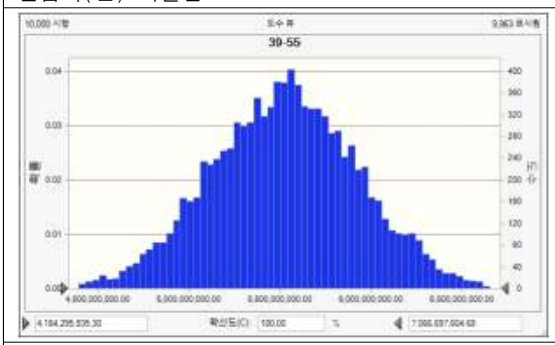
<표 2.1.2g 터널 내공 단면적별 절감액 분포> (단위: 백만원)

면적	39	43	46	50	55
39	Reference	1,376	2,418	3,799	5,522
43		Reference	1,041	2,417	4,131
46			Reference	1,378	3,109
50				Reference	4,131
55					

<표 2.1.3g 터널 내공 단면적별 절감비율 분포> (단위: %)

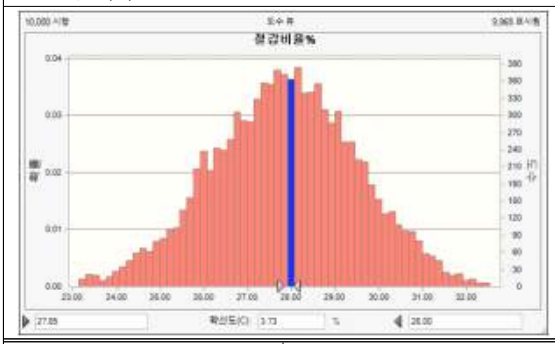
면적	39	43	46	50	55
39	Reference	8.75	14.44	20.97	27.83
43		Reference	6.20	13.33	20.82
46			Reference	7.59	15.66
50				Reference	8.67
55					

절감액(원) 확률분포



시행	10,000
평균	5,522,097,425.63
중앙값	5,527,698,452.71
표준 편차	402,616,291.27
분산	162,099,877,996,676,000.00
왜도	-0.0221
첨도	2.88
변동 계수	0.0729
최소	4,184,295,935.30
최대	7,066,697,604.68
평균 표준 오차	4,026,162.91

절감비율(%) 확률분포



시행	10,000
평균	27.83
중앙값	27.86
표준 편차	1.68
분산	2.81
왜도	-0.0930
첨도	2.91
변동 계수	0.0602
최소	22.03
최대	33.75
평균 표준 오차	0.02

최소절감액	최대절감액	평균절감액	평균절감비율(%)
4,184,295,935원	7,066,697,604원	5,522,097,425원	27.83%

<그림 2.1.1g 절감액 및 절감비율 확률분포(39m^2-55m^2)>

○ 1km 복선 터널(일반철도)에 대한 경제성 분석 결과 요약

- 내공 단면적별 평균 절감액 분포를 아래 <표 2.1.4g> 에 나타내었음.
- 10,000번의 반복 계산(모의시행)을 통하여 10,000개의 절감액을 도출하고 각 절감액의 빈도수를 막대그래프 형태로 표시한 히스토그램에서의 분포를 각 비교대상별로 제시하였는데 대표적으로 61m^2-72m^2 단면적 비교결과는 <그림 2.1.2g> 와 같음.
- 복선터널 기준 61m^{2}에서의 단면적별 절감 비율 상호비교 값은 5.91% 에서 24.19% 로 목표치인 5% 이상을 달성하는 것으로 나타났음.

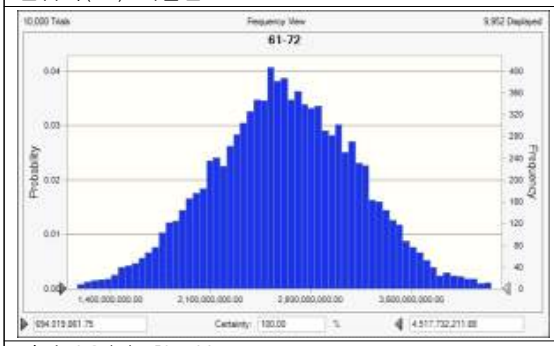
<표 2.1.4g 터널 내공 단면적별 절감액 분포> (단위: 백만원)

면적	61	65	72	84
61	Reference	1,263	2,612	6,393
65		Reference	1,360	5,128
72			Reference	3,781

<표 2.1.5g 터널 내공 단면적별 절감비율 분포> (단위: %)

면적	61	65	72	84
61	Reference	5.91	11.52	24.19
65		Reference	5.98	19.40
72			Reference	15.83

절감액(원) 확률분포



Statistic

Trials	10,000
Mean	2,612,883,568.05
Median	2,608,981,046.15
Standard Deviation	514,727,171.56
Skewness	-0.0078
Kurtosis	2.99
Coeff. of Variation	0.1970
Minimum	694,019,861.75
Maximum	4,517,732,211.88
Mean Std Error	5,147,271.72

절감비율(%) 확률분포



Statistic

Trials	10,000
Mean	11.52
Median	11.56
Standard Deviation	2.12
Skewness	-0.0777
Kurtosis	2.95
Coeff. of Variation	0.1840
Minimum	4.13
Maximum	19.47
Mean Std. Error	0.02

최소절감액	최대절감액	평균절감액	평균절감비율(%)
694,019,861원	4,517,732,211원	2,612,883,568원	11.52%

<그림 2.1.2g 절감액 및 절감비율 확률분포(61m^2-72m^2)>

○ 3km 단선 터널(일반철도)에 대한 경제성 분석 결과 요약

- 단선터널 기준 39m^{2}에서의 단면적별 절감 비율 상호비교 값은 9.11% 에서 28.64% 로 목표치인 5% 이상을 달성하는 것으로 나타났음.
- 3Km 단선터널 비교 중 대표적으로 39m^2-55m^2 단면적 비교결과는 <그림 2.1.3g>와 같음.

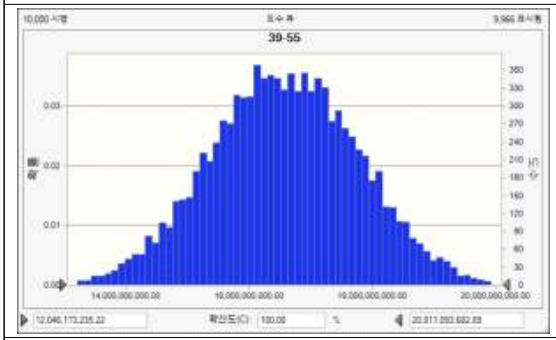
<표 2.1.6g 터널 내공 단면적별 절감액 분포> (단위: 백만원)

면적	39	43	46	50	55
39	Reference	4,146	7,253	11,393	16,564
43		Reference	3,102	7,277	12,443
46			Reference	4,125	9,321
50				Reference	5,194
55					

<표 2.1.7g 터널 내공 단면적별 절감비율 분포> (단위: %)

면적	39	43	46	50	55
39	Reference	9.11	14.94	21.62	28.64
43		Reference	6.37	13.80	21.50
46			Reference	7.81	16.10
50				Reference	8.96
55					

절감액(원) 확률분포



시행	10,000
평균	16,564,828,587.35
중앙값	16,562,222,146.67
표준 편차	1,196,904,224.79
분산	1,432,579,723,316,260,000.00
왜도	-0.0170
첨도	2.86
변동 계수	0.0723
최소	12,046,173,235.22
최대	20,811,093,682.89
평균 표준 오차	11,969,042.25

절감비율(%) 확률분포



시행	10,000
평균	28.64
중앙값	28.65
표준 편차	1.70
분산	2.90
왜도	-0.0952
첨도	2.91
변동 계수	0.0594
최소	21.61
최대	34.45
평균 표준 오차	0.02

최소절감액	최대절감액	평균절감액	평균절감비율(%)
12,046,173,235원	20,811,093,682원	16,564,828,587원	28.64%

<그림 2.1.3g 절감액 및 절감비율 확률분포(39m^2-55m^2)>

○ 3km 복선 터널(일반철도)에 대한 경제성 분석 결과 요약

- 복선터널 기준 61m^{2}에서의 단면적별 절감 비율 상호비교 값은 6.06% 에서 27.35% 로 목표치인 5% 이상을 달성하는 것으로 나타났음.
- 3Km 복선터널 비교 중 대표적으로 61m^2-72m^2 단면적 비교결과는 <그림 2.1.4g>와 같음.

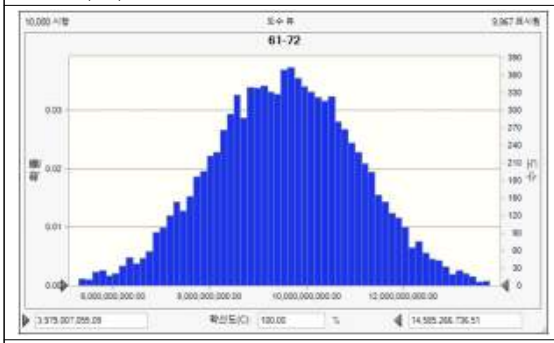
<표 2.1.8g 터널 내공 단면적별 절감액 분포> (단위: 백만원)

면적	61	65	72	84
61	Reference	3,779	9,535	21,679
65		Reference	5,765	17,930
72			Reference	11,349

<표 2.1.9g 터널 내공 단면적별 절감비율 분포> (단위: %)

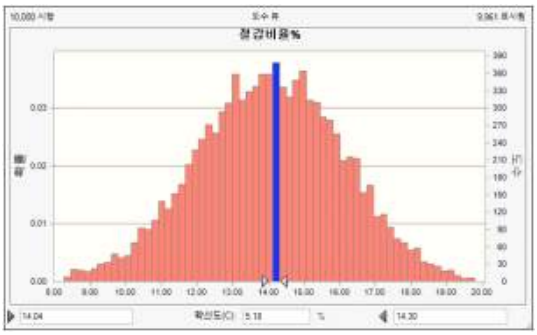
면적	61	65	72	84
61		6.06	14.02	27.35
65			8.47	22.61
72				14.30

절감액(원) 확률분포



시행	10,000
평균	9,535,071,184.66
중앙값	9,552,078,864.73
표준 편차	1,513,486,933.33
분산	2,290,642,697,347,760,000.00
왜도	-0.0327
첨도	2.87
변동 계수	0.1587
최소	3,979,007,055.09
최대	14,585,266,736.51
평균 표준 오차	15,134,869.33

절감비율(%) 확률분포



시행	10,000
평균	14.02
중앙값	14.06
표준 편차	2.06
분산	4.22
왜도	-0.1007
첨도	2.88
변동 계수	0.1466
최소	6.24
최대	20.29
평균 표준 오차	0.02

최소절감액	최대절감액	평균절감액	평균절감비율(%)
3,979,007,055원	14,585,266,736원	9,535,071,184원	14.02%

<그림 2.1.4g 절감액 및 절감비율 확률분포(61m^2-72m^2)>

○ 7km 단선 터널(일반철도)에 대한 경제성 분석 결과 요약

- 단선터널 기준 39m^{2}에서의 단면적별 절감 비율 상호비교 값은 9.23%에서 28.92%로 5% 보다 높은 절감 비율을 나타냄.
- 7Km 단선 터널 비교 중 대표적으로 39m^2-55m^2 단면적 비교결과는 <그림 2.1.5g> 와 같음.

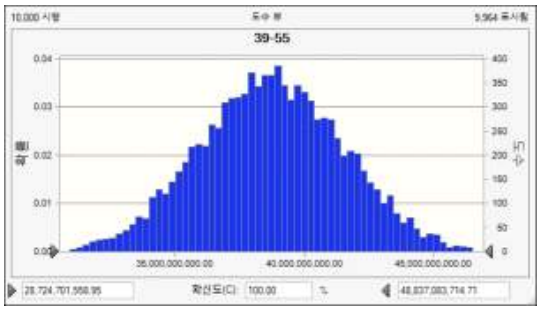
<표 2.1.10g 터널 내공 단면적별 절감액 분포> (단위: 백만원)

면적	39	43	46	50	55
39	Reference	9,698	16,901	26,620	38,716
43		Reference	7,224	16,883	29,024
46			Reference	9,661	21,799
50				Reference	12,073
55					

<표 2.1.11g 터널 내공 단면적별 절감비율 분포> (단위: %)

면적	39	43	46	50	55
39	Reference	9.23	15.07	21.85	28.92
43		Reference	6.42	13.85	21.67
46			Reference	7.91	16.27
50				Reference	9.00
55					

절감액(원) 확률분포



시행	10,000
평균	38,716,231,109.33
중앙값	38,711,428,167.75
표준 편차	2,784,819,176.63
분산	7,755,217,846,545,300,000.00
왜도	0.0063
첨도	2.86
변동 계수	0.0719
최소	28,724,701,558.95
최대	48,837,083,714.71
평균 표준 오차	27,848,191.77

절감비율(%) 확률분포



시행	10,000
평균	28.92
중앙값	28.93
표준 편차	1.70
분산	2.89
왜도	-0.0645
첨도	2.88
변동 계수	0.0588
최소	22.61
최대	35.08
평균 표준 오차	0.02

최소절감액	최대절감액	평균절감액	평균절감비율(%)
28,724,701,558원	48,837,083,714원	38,716,231,109원	28.92%

<그림 2.1.5g 절감액 및 절감비율 확률분포(39m^2-55m^2)>

○ 7km 복선 터널(일반철도)에 대한 경제성 분석 결과 요약

- 복선터널 기준 61m^{2}에서의 단면적별 절감 비율 상호비교 값은 6.12%에서 26.95%로 5% 보다 높은 절감 비율을 나타냄.
- 7Km 복선터널 비교 중 대표적으로 61m^2-72m^2 단면적 비교결과는 <그림 2.1.6g>와 같음.

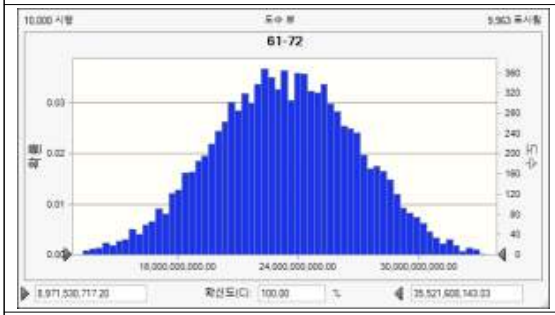
<표 2.1.12g 터널 내공 단면적별 절감액 분포> (단위: 백만원)

면적	61	65	72	84
61	Reference	8,842	23,319	49,861
65		Reference	14,535	40,992
72			Reference	26,423

<표 2.1.13g 터널 내공 단면적별 절감비율 분포> (단위: %)

면적	61	65	72	84
61	Reference	6.12	14.70	26.95
65		Reference	9.15	22.16
72			Reference	14.27

절감액(원) 확률분포



시행	10,000
평균	23,319,869,931.72
중앙값	23,323,139,717.99
표준 편차	3,576,134,345.76
분산	12,788,736,858,913,700,000.00
왜도	-0.0293
첨도	2.81
변동 계수	0.1534
최소	8,971,530,717.20
최대	35,521,608,143.03
평균 표준 오차	35,761,343.46

절감비율(%) 확률분포



시행	10,000
평균	14.70
중앙값	14.73
표준 편차	2.07
분산	4.29
왜도	-0.0953
첨도	2.83
변동 계수	0.1409
최소	5.97
최대	21.67
평균 표준 오차	0.02

최소절감액	최대절감액	평균절감액	평균절감비율(%)
8,971,530,717원	35,521,608,143원	23,319,869,931원	14.70%

<그림 2.1.6g 절감액 및 절감비율 확률분포(61m^2-72m^2)>

(3) 결 론

(가) 기술 가치 평가

○ 기술평가시, 결과의 불확실성을 줄일 수 있는 퍼지 기법의 활용

- 퍼지 포괄 기법을 적용하여 기술력을 정량적으로 평가 하였으며 그 결과 기술성 요인은 높음으로 평가 되었고, 사업성 요인은 아주 높음으로 평가되었고 종합결과도 아주 높음과 높음 사이에 있는 것으로 평가됨.

(나) 경제성 분석

○ 터널 미기압파 저감 후드 설치 시 경제성 분석

- 터널 단면적별 건설비 데이터의 불확실성을 줄이기 위하여 터널 단면적별 세부 건설비용에 대하여 확률분포를 적용하여 절감비율을 도출함.
- 단선 터널 간, 1km 비교에서는 39m^2 기준으로 43m^2 의 경우 8.75%, 46m^2 의 경우 14.44%, 50m^2 의 경우 20.97%, 55m^2 의 경우 27.83% 절감되는 것으로 나타나 모든 경우에서 절감비율이 5%를 초과하여 목표치 달성함.
- 단선 터널 간, 3km 비교에서는 39m^2 기준으로 43m^2 의 경우 9.11%, 46m^2 의 경우 14.94%, 50m^2 의 경우 21.62%, 55m^2 의 경우 28.64% 절감되는 것으로 나타나 모든 경우에서 절감비율이 5%를 초과하여 목표치 달성함.
- 단선 터널 간, 7km 비교에서는 39m^2 기준으로 43m^2 의 경우 9.23%, 46m^2 의 경우 15.07%, 50m^2 의 경우 21.85%, 55m^2 의 경우 28.92% 절감되는 것으로 나타나 모든 경우에서 절감비율이 5%를 초과하여 목표치 달성함.

<표 2.1.14g 250km/h급 단선터널 내공 단면적별 건설비 절감율 분포>

	단선터널 단면적				
터널 연장	39㎡	43㎡	46㎡	50㎡	55㎡
1㎞	Reference	8.75%	14.44%	20.97%	27.83%
3㎞	Reference	9.11%	14.94%	21.62%	28.64%
7㎞	Reference	9.23%	15.07%	21.85%	28.92%

※ 터널 입구 후드 적용한 터널 건설비 비교임

- 복선 터널 간, 1km 비교에서 모든 단면적을 각각 비교하였을 때, 61m^2 를 기준으로 65m^2 의 경우 5.91%, 72m^2 의 경우 11.52%, 84m^2 의 경우 24.19% 절감되는 것으로 나타나 모두 5% 이상 절감되는 것으로 나타나 목표치 달성함.
- 복선 터널 간, 3km 비교에서 모든 단면적을 각각 비교하였을 때, 61m^2 를 기준으로 65m^2 의 경우 6.06%, 72m^2 의 경우 14.02%, 84m^2 의 경우 27.35% 절감되는 것으로 나타나 모두 5% 이상 절감되는 것으로 나타나 목표치 달성함.
- 복선 터널 간, 7km 비교에서 모든 단면적을 각각 비교하였을 때, 61m^2 를 기준으로 65m^2 의 경우 6.12%, 72m^2 의 경우 14.70%, 84m^2 의 경우 26.95% 절감되는 것으로 나타나 모두 5% 이상 절감되는 것으로 나타나 목표치 달성함.

<표 2.1.15g 250km/h급 복선터널 내공 단면적별 건설비 절감율 분포>

	복선터널 단면적			
터널 연장	61㎡	65㎡	72㎡	84㎡
1㎞	Reference	5.91%	11.52%	24.19%
3㎞	Reference	6.06%	14.02%	27.35%
7㎞	Reference	6.12%	14.70%	26.95%

※ 터널 입구 후드 적용한 경우는 61m^2과 65m^2이고, 72m^2와 85m^2는 터널 입구 후드 적용하지 않은 경우임.

2.2 250km/h급 2세대 후드의 구조 안정성 및 시공성 향상 기술개발

가. 후드 구조체의 구조해석/평가

(1) TEST-BED 후드 구조체 시작품 구조해석

○ 개요

- 1차년도에 개발 및 구조 검토가 완료된 슬릿형 후드 구조체 설계안을 대상으로 미기압파 저감 성능 향상을 위한 주관연구기관의 축소모델 시험 등이 2차년도에 진행되었으며, 시험 결과를 반영하여 슬릿 개구율 및 수평통풍관 위치 변경, 슬릿 펜스 추가 등의 설계 변경을 진행하였음.
- 이로 인해 부재 크기 변경, 추가 부재 설계 등 구조 설계에 대한 수정 작업을 진행하고 구조 해석을 재실시하여 구조설계서에 대한 최종 안전을 확인함.
- 후드 구조 설계에 최종 반영된 부재별 소요강도 대비 설계강도의 검토 결과는 다음 표 2.2.1a와 같으며, **소요강도 대비 115% 이상 설계강도를 확보함.**

<표 2.2.1a 후드 구조체 시작품 철골 설계 및 검토 결과>

부재기호	형태	규격	소요강도 대비 설계강도 검토		비고
			설계강도 / 소요강도	판정 기준	
MG11	각형	B-550X240X9X9	2.17	1.15	Built Up Member
MG12	각형	B-400X200X6	2.13		SPSR400
MG13	각형	B-150X150X6	3.86		SPSR400
MG14	각형	B-200X200X6	6.10		SPSR400
MG15	각형	B-550X350X16X12	1.82		Built Up Member
MG16	각형	B-400X200X9	1.29		SPSR400
MB11	각형	B-100X100X3.2	1.33		SPSR400
MB12	각형	B-400X200X6	1.46		SPSR400
MD11	각형	B-100X100X3.2	14.49		SPSR400
L11	앵글	L-200X200X15	2.11		SS400
VBR11	앵글	L-65X65X6	2.21		SS400
HBR11	-	Ø22 ROD BAR	2.79		SS400

○ 구조해석 결과

- 2차년도 정성적 성과점검보고서(page 13-5)에 상세 구조검토보고서 첨부함.



Doc. No. EW-170201

구 조 검 토 보 고 서

Structural Analysis & Design Report

for

250km/h급 2세대 후드의 실용화
구조안정성 및 시공성 향상 기술개발 과제
(오송시험선 제5터널 시점부 후드 구조검토)

위 건축물(공작물)에 대하여 국토교통부 고시 건축구조기준(KBC2016) 따라 책임구조기술자가 구조설계를 수행하여 구조안전을 확인하였으므로, 본 구조설계서에 표시된 구조형식, 사용 재료 및 강도, 하중조건, 구조설계의 취지를 올바르게 파악하여 구조설계도에 표기하시기 바랍니다.
시공자는 설계하중의 증가, 단면변경, 현장조건과 설계도서의 불일치 등이 발생한 경우 이에 대해서 반드시 사전에 검토 및 확인을 요청하여 본 구조검토보고서를 최종 확정 후 시공하시기 바랍니다. 변경요청이 없는 경우 시공자가 구조설계서에 대한 최종 안전을 확인한 것으로 판단합니다.

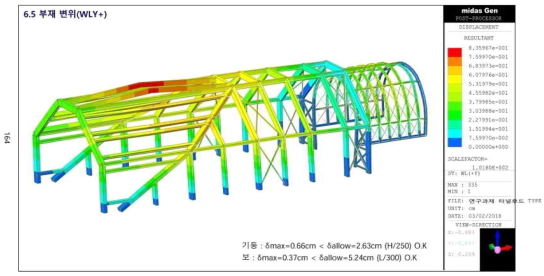
1	2017.10.11	승인용	박유지	이혜원	이혜원
차례	일자	구조설계단계	설계자	검토자	승인자

KSEA 사단법인 한국건축구조기술사회 THE KOREAN STRUCTURAL ENGINEERS ASSOCIATION

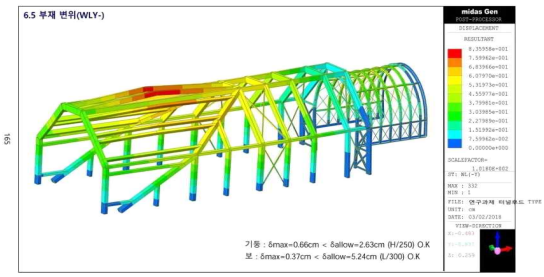
이 원 구 조 엔 지 니 어 링
건축구조기술사사무소

건축구조기술사	이 혜 원
사 업 장 주 소	경기도 수원시 영통구 대학4로 17 TEL:(031)242-0550 e-mail:ewon@ewons.co.kr

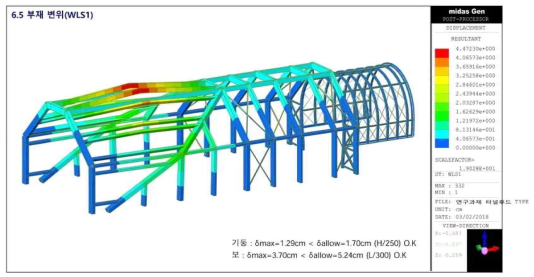
(a) 구조 검토 보고서



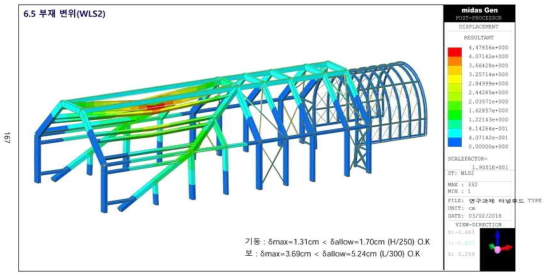
(b) 부재 변위(WLY+)



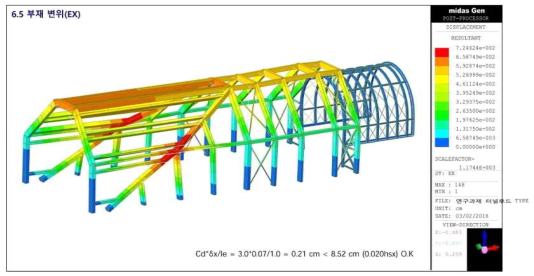
(c) 부재 변위(WLY-)



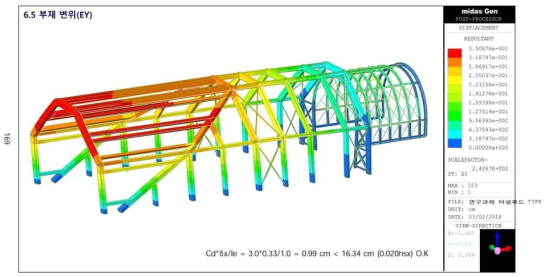
(d) 부재 변위(WLS1)



(e) 부재 변위(WLS2)



(f) 부재 변위(EX)



(g) 부재 변위(EY)

<그림 2.2.1a 후드 구조체 시작품 구조해석 결과 그래프>

(2) 교량상부 설치 후드 구조체 구조해석

○ 개요

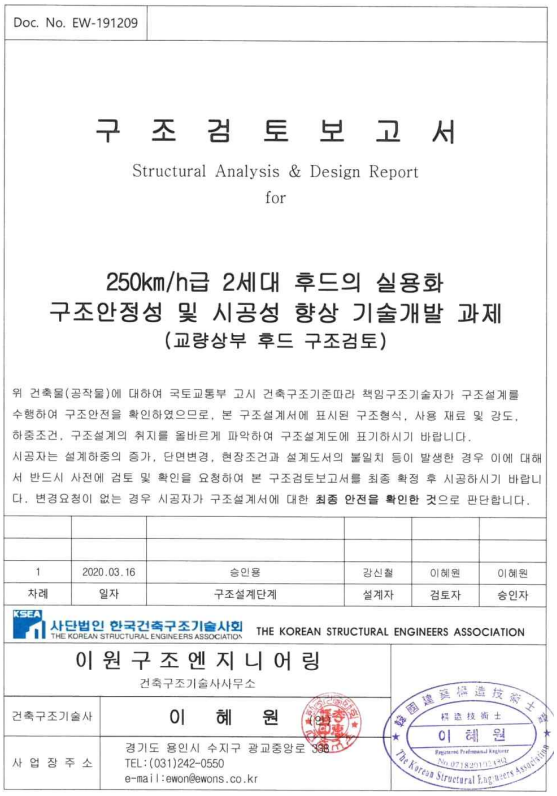
- 교량상부 후드 구조체의 설계는, 교량 구조물 상부에 후드 구조물을 직접적으로 연결하여 설치하는 방법과 교량 구조물에 직접적인 영향을 주지 않고 별도의 기초와 구조물을 설계하여 설치하는 방법의 2가지로 구분할 수 있음.
- 본 연구에서는 교량 구조물에 직접적인 영향을 미치지 않고 설치할 수 있는 후드 구조체 설치 방법으로 그 범위를 제한하였으며, 교량 상부 후드 구조체의 설계 및 구조해석을 실시하여 구조적 안정성을 검증함.
- 교량상부 후드 구조체의 구조 설계에 반영된 부재별 소요강도 대비 설계강도의 검토 결과는 표 2.2.2a와 같으며, **소요강도 대비 115% 이상의 설계강도가 확보됨을 확인함.**

<표 2.2.2a 교량상부 후드의 구조 설계 및 검토 결과>

부재기호	형태	규격	소요강도 대비 설계강도 검토		비고
			설계강도 / 소요강도	판정 기준	
MG11	각형	B-500X250X12X12	1.69	1.15	Built up Member
MG12	각형	B-500X250X12X12	1.94		SPSR400
MG15	각형	B-500X250X12X12	1.20		Built up Member
MG16	각형	B-500X250X12X12	1.73		SPSR400
MG17	각형	B-500X250X12X12	1.22		Built up Member
MTT1	각형	B-500X250X12X12	1.54		Built up Member
MTD1	각형	B-500X250X12X12	3.34		SPSR400
MTB1	각형	B-500X250X12X12	3.03		Built up Member
MB12	각형	B-500X250X12X12	2.87		SPSR400
MB13	각형	B-500X250X12X12	1.58		SPSR400
SB1	각형	B-500X250X12X12	2.53		SPSR400
VBR1	앵글	L-75X75X9	2.25		SS400

○ 구조해석 결과

- 3차년도 정성적 성과점검보고서(B-1-1)에 상세 구조검토보고서 첨부함.



Doc. No. EW-191209

구 조 검 토 보 고 서

Structural Analysis & Design Report

for

250㎞/h급 2세대 후드의 실용화
구조안정성 및 시공성 향상 기술개발 과제
(교량상부 후드 구조검토)

위 건축물(공작물)에 대하여 국토교통부 고시 건축구조기준따라 책임구조기술자가 구조설계를 수행하여 구조안전을 확인하였으므로, 본 구조설계서에 표시된 구조형식, 사용 재료 및 강도, 하중조건, 구조설계의 취지를 올바르게 파악하여 구조설계도에 표기하시기 바랍니다.
시공자는 설계하중의 증가, 단면변경, 현장조건과 설계도서의 불일치 등이 발생한 경우 이에 대해서 반드시 사전에 검토 및 확인을 요청하여 본 구조검토보고서를 최종 확정 후 시공하시기 바랍니다. 변경요청이 없는 경우 시공자가 구조설계서에 대한 **최종 안전을 확인한** 것으로 판단합니다.

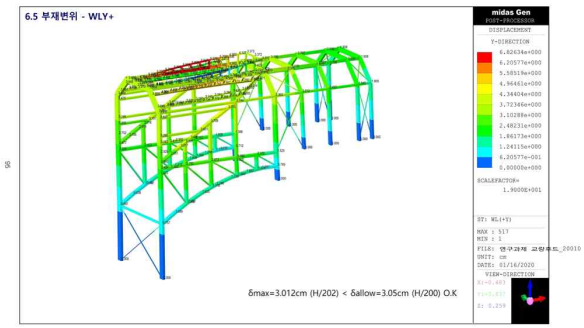
1	2020.03.16	승인용	강신철	이혜원	이혜원
차례	일자	구조설계단계	설계자	검토자	승인자

사단법인 한국건축구조기술사회 THE KOREAN STRUCTURAL ENGINEERS ASSOCIATION

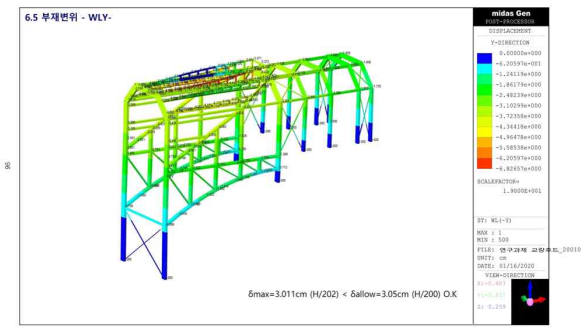
이 원 구 조 엔 지 니 어 링
건축구조기술사무소

건축구조기술사	이 혜 원	
사 업 장 주 소	경기도 용인시 수지구 광교중앙로 338 TEL:(031)242-0550 e-mail:ewon@ewons.co.kr	

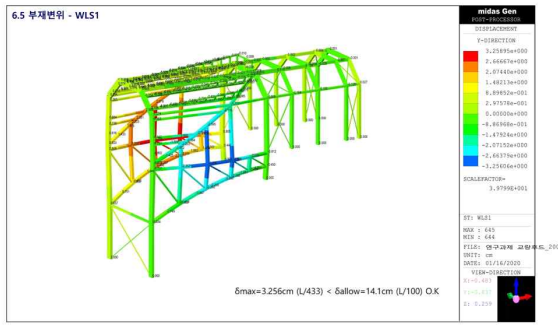
(a) 구조 검토 보고서



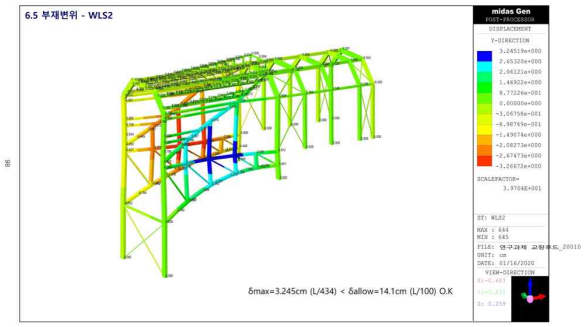
(b) 부재 변위(WLY+)



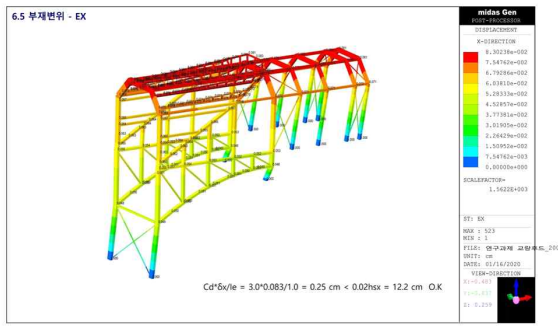
(d) 부재 변위(WLY-)



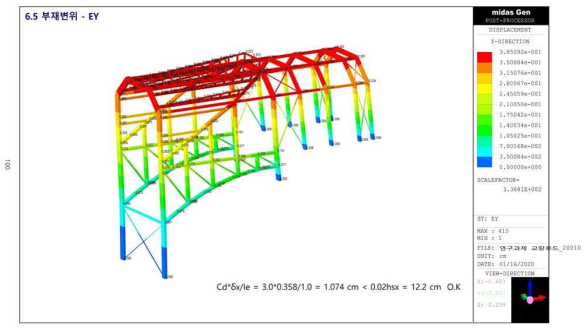
(e) 부재 변위(WLS1)



(f) 부재 변위(WLS2)



(g) 부재 변위(EX)



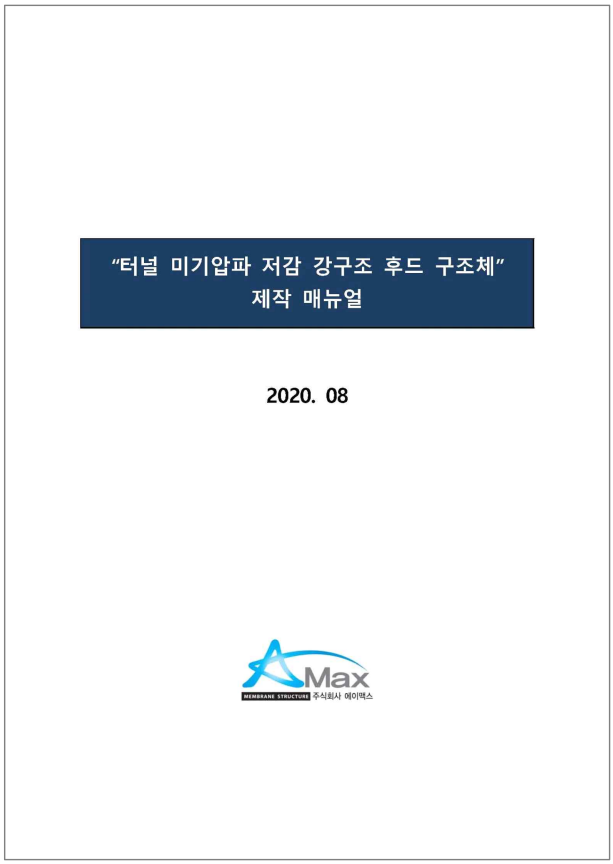
(h) 부재 변위(EY)

<그림 2.2.2a 교량상부 후드 구조체 구조해석 결과 그래프>

나. TEST-BED 후드 구조체 제작 매뉴얼

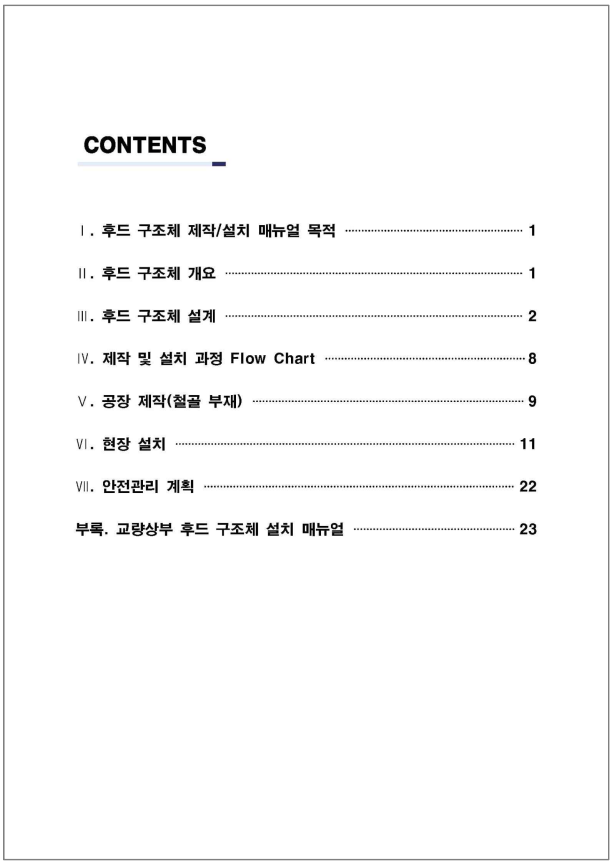
(1) 강구조 후드 구조체 제작 매뉴얼

- 본 연구 수행을 통해 개발된 터널 미기압파 저감 강구조 후드 구조체는 국내 공용 중 또는 신설 철도 노선 터널에 바로 적용이 가능하지만 기존 국내 설치 사례가 없어 설치 순서 등 가이드라인 제시가 필요함.
- 후드 구조체는 향후 사용자에게 제공될 표준 설계도를 참고 및 활용할 수 있으나 설치 대상 터널의 단면적 크기, 지형 환경 조건 등을 고려한 재설계 과정이 필요함.
- 본 매뉴얼은 후드 구조체의 구성 및 기능 그리고 설계에서부터 공장 제작, 현장 설치까지의 일련의 과정을 소개하고, 각 과업에 대해 설치 담당자가 쉽게 이해할 수 있도록 지침 제공의 목적으로 개발됨.
- 또한, 철도 교량과 인접해 있는 터널 입구 환경 조건에서의 후드 구조체 설계 및 설치를 위한 가이드라인을 개발하였으며, 교량 구조물에 직접적인 영향을 미치지 않는 설치 방안으로 범위를 제한하였음.
- 개발된 후드 구조체 제작 매뉴얼은 다음과 같으며, 3차년도 정성적 성과점검보고서(B-4-2)에도 상세하게 수록되어 있음.


"터널 미기압파 저감 강구조 후드 구조체"
제작 매뉴얼

2020. 08

MEMBRANE STRUCTURE 주식회사 에이맥스


CONTENTS

Ⅰ. 후드 구조체 제작/설치 매뉴얼 목적 ····· 1
Ⅱ. 후드 구조체 개요 ····· 1
Ⅲ. 후드 구조체 설계 ····· 2
Ⅳ. 제작 및 설치 과정 Flow Chart ····· 8
Ⅴ. 공장 제작(철골 부재) ····· 9
Ⅵ. 현장 설치 ····· 11
Ⅶ. 안전관리 계획 ····· 22
부록. 교량상부 후드 구조체 설치 매뉴얼 ····· 23

Ⅰ 후드 구조체 제작/설치 매뉴얼 목적

본 매뉴얼은 국토교통부의 철도기술연구사업 과제 수행을 통해 개발되었으며, 고속화철도 터널에서 발생되는 미기압파 저감을 위한 강구조 후드 구조체의 설계, (공장)제작, 현장 설치를 위한 지침 제공에 그 목적이 있으며, 포괄적으로 내용이 수록되어 일부 내용은 현장별 상이하게 적용될 수 있음

Ⅱ 후드 구조체 개요

후드 구조체는 고속화철도 터널에서 발생되는 미기압파로 인한 저감을 위한 강구조물이며, 주요 구성 요소는 다음과 같음.



슬릿	미기압파 배출을 위한 개구부	장크 복합패널	외부 마감 재료
슬릿 팬스	슬릿 상부 구조물로 미기압파 저감 효과 증대	알루미늄 패널	내부 마감 재료
수평통풍관	미기압파 배출을 위한 장치, 배출량 조절 가능	차마	외부 이물질의 수평통풍관 내부 유입 방지

Ⅲ 후드 구조체 설계

후드 구조체의 설치 대상 터널이 선정되면 표준설계도를 활용하여 다음과 같은 터널 입구 환경 유형을 고려하여 적합한 모델을 선정하고 현장 환경에 맞는 단면 설계를 진행해야 함

표 1. 터널 입구 지형환경 유형 및 특징

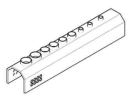
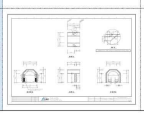
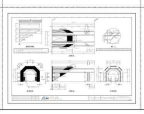
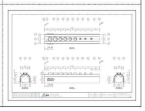
유형	유형별 현장 모습	특징
좌우 모두 평지 지형		▸ 터널 입구 좌우측 모두 평평한 지형으로 시공성이 가장 좋은 환경임 ▸ 진입로 및 작업공간 확보에 유리하고 기초 구조를 조성에도 작업이 수월함
좌우 모두 사면 지형		▸ 터널 입구 좌우측 모두 사면으로 둘러싸인 지형으로 후드 구조체 설치 공간 확보를 위한 사면 절토에 대한 사전 검토가 필요함 ▸ 사면 절토를 위한 장비 반입 시 공간 제약으로 소형 장비 사용이 요구될 수 있음
좌우 한쪽 사면 지형		▸ 터널 입구 한쪽 면이 사면인 지형으로 후드 구조체 설치 공간 확보를 위한 사면 절토에 대한 사전 검토가 필요함
교량 지형		▸ 교량 상부에 후드 구조체를 설치해야 하는 유형으로 교량 구조물에 직접적인 부담을 주지 않는 시공법 적용 ▸ 터널 입구까지의 진입로 및 작업장 확보 필요
기타		▸ 계곡 등의 지형으로 후드 구조체 설치가 불가능한 것으로 판단되는 지형으로 진입로 및 작업공간 확보 불가능 (예_KTX 경강선 진조터널 시점)

■ 모델 선정

강구조 후드 구조체는 아래 표에서 제시한 예시와 같이, ① 연장이 짧고 수평통풍관만 적용된 타입, ② 약 27m 길이의 수평통풍관 및 슬릿이 적용된 타입, ③ 약 52m 길이의 상부통풍관이 적용된 장대 타입의 크게 3가지 유형으로 분류할 수 있으며, 터널 규모에 따른 세부 모델들이 개발되어 있음.

후드 구조체 모델은 터널의 크기, 길이 등의 조건에 따라 적용 모델이 결정되며 모델별 미기압파 저감 성능은 상이할 수 있음.

표 2. 강구조 후드 구조체 유형별 분류

유형	① 수평통풍관 적용	② 슬릿+수평통풍관 적용	③ 상부통풍관 적용
길이	8m, 14m	27m, 30m	52m
형상			
표준 설계 도면			

※ 강구조 후드 구조체의 세부 모델들은 한국철도기술연구원에서 제공하는 표준설계도를 통해 확인 가능함.

■ 설계 변경

① 후드 구조체 단면 형상 변경(터널-후드 내공단면적비 적용)

설치 대상 터널, 주변 환경, 궤도 설계 내용 등 현장 조건에 따라 후드 구조체 표준설계도 제원이 그대로 반영이 가능한 경우에는 설계변경이 필요 없으나, 설계변경이 필수로 요구되는 현장이 많음.

설계변경이 필요한 경우, 먼저 후드 내공단면적 크기에 맞도록 후드 단면 형상을 수정해야 함. 후드 단면 형상은 표 1과 같이 5개의 면으로 둘러싸인 다각형 형태이며, 현장 조건 맞게 너비, 높이 등을 조절하여 산정된 내공단면적 크기에 맞게 변경되어야 하며, 형상도 변경이 가능함.

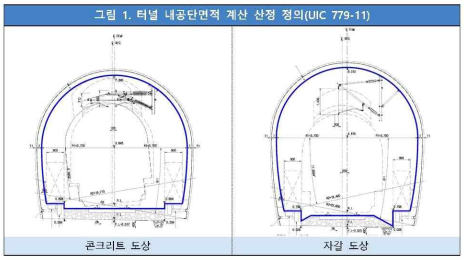
후드 내공단면적의 크기는 아래의 표에서 명시한 터널 크기에 대해서는 동일하게 1.554배가 적용됨.

표 3. 터널 크기별 후드 내공단면적

구분	터널 내공단면적 크기	후드 내공단면적 크기
단선	40 ㎡	터널 내공단면적의 1.554배
단선	50 ㎡	
단선	57 ㎡	
복선	64 ㎡	
복선	92 ㎡	

터널 내공단면적의 크기를 계산할 때는, 다음 표 예시에서 보여주는 계산 영역을 참고하여 산정하여야 함.

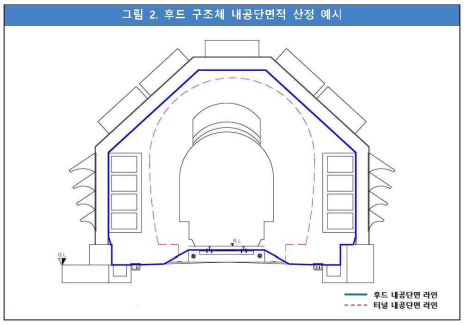
그림 1. 터널 내공단면적 계산 산정 정의(UIC 779-11)



콘크리트 도상 | 자갈 도상

다음 그림은 실제 터널에 후드/터널 내공단면적비를 적용하고 터널 현장에 맞게 후드 구조체를 설계한 사례이며, 후드 내공단면적 산정 시 바닥라인은 배수로 등 실제 현장 조건이 모두 반영이 되어야 함.

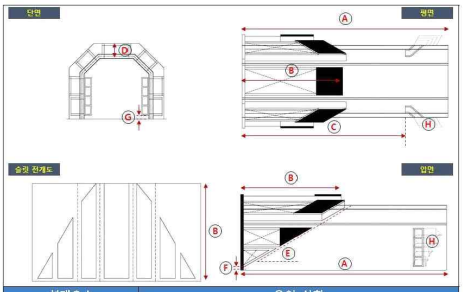
그림 2. 후드 구조체 내공단면적 산정 예시



① 상기 후드 단면도에서 수평통풍관은 터널 내공단면 라인에 침범하지 않아야 함.
② 상기 후드 단면도에서 양쪽의 처마가 터널 입구영역의 양쪽 사면과의 간섭이 있을 경우에는 처마의 형상을 변형 설계하여도 무방함.
- 단 빗물 또는 눈의 수평통풍관 내부 유입을 방지할 수 있도록 설계 필요
③ 후드 측벽과 사면과의 사이에서, 맨 아래쪽 처마와 사면과의 간격은 600mm 이상을 유지해야 함. 즉 수평통풍관의 배출구를 막지 않아야 함.
④ 후드 구조체를 설치하는 좌/우 폭 공간이 좁은 상황에서는, ①번 ~ ③번 사항들을 준수하는 조건에서 후드의 폭을 감소시키고, 후드의 높이를 증가시키는 변형설계가 가능함.
⑤ 후드 벽체 두께는 구조해석에 의하여 결정되며, 최소 두께로 설계 으망
⑥ 후드 구조체는 기밀구조로 제작되어야 공기역학적 성능을 발휘함. 즉, 누수가 되지 않아야 하며 특히, 후드 구조체의 내부가 기밀 되어야 함.

2 세부 제원 수정

후드 구조체 단면의 형상 변경 후에는 이에 따른 세부 제원들의 설계변경, 구조해석 등의 과정을 통해 최적 설계 과정이 필요하며, 설계변경 시 유의해야 할 사항은 다음과 같음.



설계요소		유의 사항
후드 길이	전체 길이 Ⓐ	• 변경 불가
슬릿	시작/끝 위치 Ⓑ	• 변경 불가 - 후드 구조체의 슬릿은 수직면, 경사면, 상부면에 각각 설계되어 있으며, 후드 시점으로부터의 위치는 동일하며 시작 위치는 변경 불가. - 후드 상부면에는 직사각형 형태의 가장 긴 슬릿이 설계되어 있으며, 끝 지점의 위치는 변경 불가
	개구율	• 변경 불가 (단, 허용 오차범위 1% 이내 가능) - 슬릿이 적용된 후드 모델들은 모델별로 상이한 개구율이 설정되어 있으며, 개별 슬릿의 크기를 조정하여 개별 개구율을 조정할 수 있으나 전체 개구율은 변경 불가함
	펜스 높이 Ⓓ	• 변경 불가 - 펜스 높이는 후드벽체 두께를 포함함(벽체 두께 + 펜스 순수 높이)
	각 도 Ⓔ	• 변경 가능 - 슬릿의 각도는 입면도를 기준으로 시작점부터 지붕면 슬릿 끝까지 동일한 각도를 유지함. 후드 높이가 변경되면 변경 가능

	시작 높이 Ⓕ	• 변경 불가 - 슬릿은 수직벽 아래에서부터 일정한 각도를 가진 직각 삼각형의 형태로 설계되며, 가장 하부의 슬릿 시작점 높이는 변경 불가
	기 타	• 후드 경사면에 위치한 슬릿은, 항상 면의 가운데에 위치하도록 조정 필요
수평 통풍관	위 치 Ⓒ	• 변경 불가 - 후드 시점으로부터 수평통풍관이 설치되는 위치는 변경 불가
	높 이 Ⓖ	• 변경 가능 - 수평통풍관의 설치 높이는 수평통풍관 자체 높이의 중심이 차량 중심과 일치되도록 설치하는 것을 원칙으로 하나, 불가능한 경우 위치 조정 가능
	단면적	• 변경 불가
	크 기	• 변경 가능 - 수평통풍관은 좌우 각각 1개씩 있으며 각 4개의 칸으로 구성되어 있음 - 단면적의 크기가 변하지 않는 조건에서 가로, 세로 길이는 각각 변경 가능함. 즉, 단면적 = 가로 x 세로 = 일정
	개폐식 Door	• 변경 가능 - 수평통풍관 단면 크기에 따라 제원이 결정됨 - 좌우 4개씩 총 8개가 제작되어야 하며, 설계 사양에 따라 아래에서부터 한칸 또는 두칸을 막고 현장 검증시험(또는 속도 증속 시) 시 조정 가능하도록 개폐식으로 제작 필요
처마 Ⓗ	각 도	• 변경 불가
	길 이	• 변경 가능 - 수평통풍관 크기 변경에 따른 길이 조정 가능

※ 상기 내용을 포함한 기타 상세한 설계 제원은 표준설계도의 지침을 따름

후드 구조체 설계 시 열차 풍하중이 구조해석 단계에서 반드시 고려되어야 하며, 터널 단면적별 열차 설계속도에 대한 열차 풍하중 적용 설계값은 다음 표와 같으며, 구조해석 시에 동적 풍하중으로 적용하여야 함. 기타 태풍 하중, 설하중 등도 적용하여야 함.

표 4. 터널 단면적별 열차속도에 대한 풍하중 설계값

터널 단면적	설계속도	적용 사례	열차 풍하중 설계값
40 ㎡	250 km/h	동해선, 중부내륙철도 등	5,000 Pa
50.3 ㎡	250 km/h	오송 철도종합시험선로 시험 제5터널	3,600 Pa
57 ㎡	300 km/h	고속철도 단선터널	4,500 Pa
61 ㎡	260 km/h	큐슈 신칸센, 홋카이도 신칸센	3,000 Pa

IV 제작 및 설치 과정 Flow Chart

■ 공장 제작 (철골 부재)



■ 현장 설치



V 공장 제작 (철골 부재)

■ 공장 제작 (철골 부재)

1 철골 부재 생산



- 성능보강형 Built up Beam 공장 생산
  - 설계 강도 및 규격 준수

2 절단 및 가공



- Shop-drawing에 명시된 설계내용에 따라 치수를 정확하게 절단 및 가공

3 조립 및 용접



- Shop-drawing에 명시된 설계내용에 따라 철골 부재 조립 및 용접

4 부재 검사



- 조립 부재의 도면 준수 사항, 변형 등 검사 실시
- 용접부에 대한 비파괴검사 실시

5 도장 및 도막 측정



- 하도 및 상도 도장 후 건조
- 도장상태 검사
  - 표면처리, 도막두께, 외관 등
  - 적용 도장 규격에 따라 적용

6 공장 야적



- 도장 확인이 완료된 부재는 크레인으로 인양 및 공장내 야적
- 야적 시 받침목은 상하 등일 선상에 배치

7 공장 출하(운송)



- 크레인을 이용하여 상차함
- 출하되는 부재에 대한 균열, 파손, 변형 등 육안 검사 후 출하
- 부재 순서(목록)에 따라 확인 후 출하

VI 현장 설치

■ 현장 설치 전 사전 작업

1 터널 주변 환경 조사



- **하부구조물 조사(기초, 지반 등)**
  - 사면 안전성 검토
  - 지반 개량 및 기초 보강 필요 여부
- **시공여건 조사**
  - 자재 수급 등향 파악
  - 기능공 수급 등향 파악
  - 진입로 및 작업공간 파악
  - 작업 시간 확보 가능 여부 파악
  - 기타 터널 시설물 파악(전차선, PC갱문 등)을 통한 간섭사항 확인

2 지반 보강 및 기초 구조물 공사



- 지반이 취약한 경우 지반 개량 공사 또는 기초 구조물을 시공
- 시공 후 지반 및 기초 구조물에 대한 안정성 검토 실시

3 진입로 및 작업장 확보



- 차량 및 장비 반입을 위해 터널 앞 설치 현장까지 진입로를 확보
- 자재 야적 및 설치 장비 세팅을 위한 작업 공간 확보

4 PC갱문(개착터널) 절개부 마감 공사 (해당되는 경우)



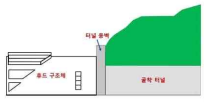
- 상부면이 원통절개형으로 개방된 형태로 터널 앞에 구조물이 설치된 경우에 해당
  - 철골 공사 시 PC갱문 골조 작업 선 진행 후 후드 구간 작업 진행
  - 후드 구조체와 등일하게 기밀되도록 마감 필요
  - 마감 패널 작업은 후드 구간과 등시 진행 가능
- 절개부 마감을 위한 구조물 설치 전 마감 설계안에 대한 구조 안정성 검토 실시

A PC갱문(개착터널)이 있는 경우



- 터널 중벽 앞으로 PC갱문(개착터널)이 설치되어 있는 현장에서는 PC갱문과 후드 구조체가 연결되도록 시공
  - PC갱문과 후드 구조체 접합부에 기밀을 위한 후드 뒷벽 설치 필요 (개념도 및 설치 사례 사진 참조)
- 접합부의 충분한 기밀성 확보 중요

B PC갱문(개착터널)이 없는 경우



- 터널 중벽에 후드 구조체가 접합되도록 시공
  - 후드 뒷벽 시공 불필요(개념도 참고)
- 접합부의 충분한 기밀성 확보 중요

■ 인원 계획

구분	작업지휘	반장	작업원	장비	계	비고
골조 설치	1	1	3	2	7	
패널 설치	1	1	4	2	8	

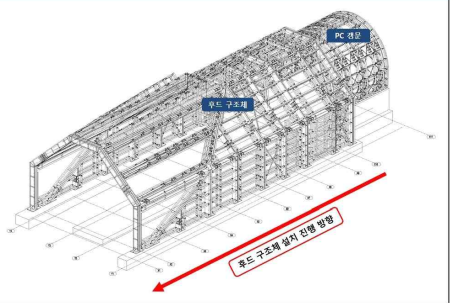
■ 장비 계획

구분	지게차	트럭 크레인	이동식 크레인	고소 작업차	트럭	비고
골조 설치	1	1	1	1	1	
패널 설치	1			2	1	

▶ 골조 설치 시 장비 : 양중장비(50톤기준) 1대, 고소작업차(5톤기준) 1대를 기준 (※여건에 따라 적용)
▶ 패널 설치 시 장비 : 고소작업차(5톤기준) 2대를 기준 (※여건에 따라 적용)

■ 진행 방향

철골 부재 및 마감 패널 설치 진행 방향



· 철골 부재 설치는 후드 중심(터널 방향)에서 후드 시점 방향으로 진행
· 마감 패널 설치는 내부 마감 후, 외부 마감을 기본 설치 방향으로 설정하며, 간섭이 되지 않는 구간은 내·외부 동시 작업 진행

■ 후드 구조체 현장 설치

1 현장 실측



· 후드 구조체 설치를 위한 현장 실측
  - 설계도면과 확인 필요

2 앙카 볼트 설치



· 메인 골조 설치를 위한 앙카 볼트 설치
  - 신설 구간은 매입앵커 시공가능
· 설치 후 인발시험 실시
· 설치 전 앙카 볼트 크기 및 도면 확인

3 부재 반입 및 야적



· 철골 부재 현장 반입
· 차량 현장 진입 시 유도원 배치
· 경사로 정치 시 고임목 설치
· 크레인 장비로 하차
  - 하차 시 파손 및 안전사고 유의
· 사전 확보된 야적장에 하차
  - 야적장은 차량 및 장비 동선에 방해가 되지 않는 곳 확보

4 부재 현장 검수



· 휨, 파손 등 변형 여부에 대한 육안검사
· shop-drawing 도면과 확인
· 이상 발견 시 반출 처리

5 설치 장비 반입



· 크레인 및 고소차 반입
· 고소차 반입
· 장비 현장 반입 시 유도원 배치
· 장비 기사 외 조작 금지
· 장비 고정 시 터널 시설물 파손 유의
· 현장 사운전 실시

6 철골 부재 설치



· 앙카 볼트 위치에 베이스플레이트 설치
  - 철골 부재 설치 후 무수축몰탈 실시
· 크레인에 골조를 고정하여 인양 및 설치
  - 인양 시 하부에 작업자 위치 금지
  - 장비기사와의 정확한 의사소통 필요
  - 휨, 파손 등 변형 여부 확인
· 접합부 볼트 조립
  - 고소차 탑승 제한 인원수 준수
  - 추락 주의(안전장치 고정 필수)
· 설치 완료 후 터치업 작업 실시
· 철골부재의 시공검사 및 검측
  - 볼트세트 토크시험, 후시공 앵커 인발시험 등

7 전차선 지지대 설치(해당되는 경우)



· 후드 구조체 설치 시 전차선 지지대와 간섭이 발생할 경우 후드 구조체 상부에 전차선 지지대 설치
· 한국철도시설공단 등 유관기관과의 사전 협의 필수
  - 이전 가능 여부, 비용 부담 주체 등

8 접지 설비 설치



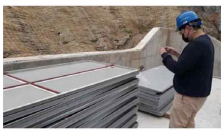
· 고압전류가 흐르는 철도현장에서 강재를 사용한 후드 구조체의 특성상 접지는 필수로 요구됨
· 대상 현장 및 후드 구조체에 대한 요구 저항값 계산 등 접지 설계 사전 실시
· 철골 부재 설치 작업과 간섭 유의
  - 장비 등 동선에 주의
· 전공 장비 사용 시 안전요원 배치
· 저항값 측정으로 접지 확인
· 외부 노출 부분은 내구성이 좋은 파이프로 마감
· 접지 단자함 및 매설 위치 안내판 설치

9 마감패널 반입



· 운반 차량 현장 진입 시 유도원 배치
· 하차 시 휨, 파손 등에 유의
· 야적 시 받침목은 상하동일 선상에 배치
· 지정된 야적장에 하차
  - 작업 동선에 간섭되지 않도록 유의

10 마감패널 현장 검수



- 규격, 휨, 파손 등에 대한 육안검사 실시
- 내부 알루미늄 패널은 보강재 설치 확인
  - 열차풍압에 대비한 보강재 설치 필요
- 이상 발견 시 즉시 반품

11 내부 마감 패널 설치



- 3인 1조 작업 인원 구성 준수
- 고소차를 이용한 상부 작업 시 하부에 작업인원 배치 금지
  - 패널 및 작업자 추락에 유의
- 장비기사와 정확한 의사 소통 필요
  - 철골 부재 등 파손 주의
- 풀림 방지 너트로 고정
  - 볼트 고정 여부 확인
- 설치 완료 후 패널 사이는 실리콘 마감
- 내·외부 동시 작업 가능

12 외부 마감 패널 설치



- 3인 1조 작업 인원 구성 준수
- 고소차를 이용한 상부 작업 시 하부에 작업인원 배치 금지
  - 패널 및 작업자 추락에 유의
- 장비기사와 정확한 의사 소통 필요
  - 철골 부재 등 파손 주의
- 설치 완료 후 패널 사이는 실리콘 마감
- 내·외부 동시 작업 가능

13 수평통풍관 설치



- 공장 제작 제품에 대한 색상, 규격, 파손 등 육안검사 실시
- 설치 시 지지를 위한 하부 고정 구조물 설치(완료 후 제거)
- 개폐 도어는 본체 설치 후 조립
- 설치구간 마감패널은 수평통풍관 설치 후 작업

14 쳐마 설치



- 공장 제작 제품에 대한 색상, 규격, 파손 등 육안검사 실시
- 통풍관 배출구를 가리지 않도록 유의
- 설치구간 마감패널은 수평통풍관 설치 후 작업
- 설치 시 하부에 작업자 배치 금지

15 줄눈 실리콘 작업



- 패널 사이 줄눈 실리콘 시공
- 고소차를 이용한 상부 작업 시 하부에 작업인원 배치 금지
  - 장비 및 작업자 추락에 유의

16 기타 시설물 설치 및 현장 정리



- 안전손잡이 등 안전시설 설치
  - 철도 안전시설 설치기준에 따라 설치
- 기타 마무리 작업 실시
- 패널 등 타 시설에 손상 유의

■ 기타 시설물 설치

1) 후드 구조체 내부 안전통로 및 안전손잡이

- 터널 내부에 설치된 안전손잡이와 안전통로를 후드 시점까지 연장 설치
- 안전통로의 경우, 배수로 상부를 콘크리트 덮개로 보행로로 활용 할 수 있도록 설치



안전손잡이 설치



배수로 덮개 설치를 통한 안전통로 확보

2) 수평통풍관 개폐 도어 및 고정장치

- 수평통풍관은 4개의 칸으로 구성되어 후드 내부 좌·우측에 각 1개씩 설치되어 있으며, 각각의 칸에는 절반씩 개폐가 가능한 양문형 Door를 설치함
  ※ 수평통풍관의 개구율은 후드 모델별로 상이하며, 각 모델별 표준설계도의 지침을 따를 것(도면집 참조 요망)
- 수평통풍관 개폐 Door는 열차풍 등으로 인해 임의로 개폐가 되지 않도록 고정이 되어야하며, 2중 잠금장치를 설계함
- 수평통풍관 개폐 Door 및 잠금장치는 수평통풍관 설계 도면에 함께 명시되어 있으며, 수평통풍관 제작/설치 시 함께 진행



수평통풍관 개폐 도어



2중 잠금장치(T-bar 및 U자형 걸쇠)

3) 상부 진입을 위한 사다리

- 유지보수 및 점검 등을 위해 상부면으로 진입이 가능한 고정 사다리를 후드 외벽에 설치
- 터널 면벽 구조물 상부로 진입이 가능한 경우에는 후드와 터널 접합부 상부에 사다리를 설치하여 후드 상부로 이동할 수 있음



외부 벽면 사다리 설치 사례



터널 구조물 상부 사다리 설치 사례

4) 상부 안전펜스

- 유지보수 및 점검을 위한 작업자의 상부 작업 시 추락 방지를 위한 안전펜스 설치
- 상부면 외곽 라인을 따라 전체를 설치하는 방안 또는 상부면 가운데에 일자(—) 형태로 설치 할 수 있음



상부면 외곽 라인 전체에 펜스 설치 사례



상부면 가운데 일자(—)형태로 설치 사례

5) 산짐승 진입 방지 안전펜스

- 산짐승의 후드 구조체 상부 진입을 통한 선로 위 추락 사고 방지를 위한 안전펜스 설치
- 눈사태 또는 산사태 시 후드 상부로 이물질 유입 방지 역할



산짐승 진입 방지용 안전펜스 설치 사례 1



산짐승 진입 방지용 안전펜스 설치 사례 2

Ⅶ 안전관리 계획

■ 안전관리 기본 계획

구분	내용	비고
작업동선	근로자와 건설장비의 동선 계획 구분	신호수, 장비유도원
작업지휘	담당 작업지휘자의 배치	
작업신호	신호체계 구축	무전기, 깃발
추락방지	고소작업용 안전고리 확보(공장 제작)	안전벨트, 생명줄
안전관리자	전담 안전관리자 배치	
화재예방	불꽃감시자 배치, 용접불티 방지우산(석면포)	소화기, 방화수, 확성기

■ 작업 전 TBM(Tool Box Meeting) 실시



- 안전교육 실시
  ※ 장마철, 폭염대비 등 취약시기 시 별도 안전교육 실시
- 전담 안전관리자 배치
- 당일 작업에 대한 지침 및 작업자 배치
- 작업 전 장비점검
- 개인보호구 확인

■ 장비 운영 및 관리 계획



- 장비별 작업 방향 등 계획 수립
- 장비별 주용도 외 사용 제한
- 작업 반경 내 작업관계자 외 출입금지
- 악천후 시 작업 중지
- 탑승구역 이외 탑승 금지
- 장비기사 외 조작 금지
- 현장 내 운행 시 제한속도 준수

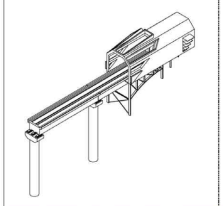
부록 교량상부 후드 구조체 설치 매뉴얼

■ 교량 구조물에 후드 구조체 하중이 반영되지 않은 경우

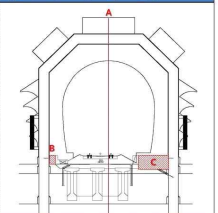
본 장에서는 철도 교량과 인접해 있는 터널 입구 환경 조건에서의 후드 구조체 설계 및 설치 가이드라인을 소개하고 있으며, 그림과 같이 교량 구조물에 직접적인 하중 영향을 미치지 않는 경우를 기본 설치 방안으로 제시하고 있음.

교량 상부라는 환경적인 특성을 고려한 설계 및 현장 설치 방법(순서)를 제시하며, 설치를 위한 각 단계별 세부적인 사항은 본 매뉴얼의 Ⅳ장부터의 내용을 참조할 수 있음.

그림 3. 교량상부 후드 구조체 (독립적인 후드 기초 별도 설치)



교량상부 후드 구조체 3D 모델



교량상부 후드 구조체 단면

1 교량상부 후드 구조체 단면 설계

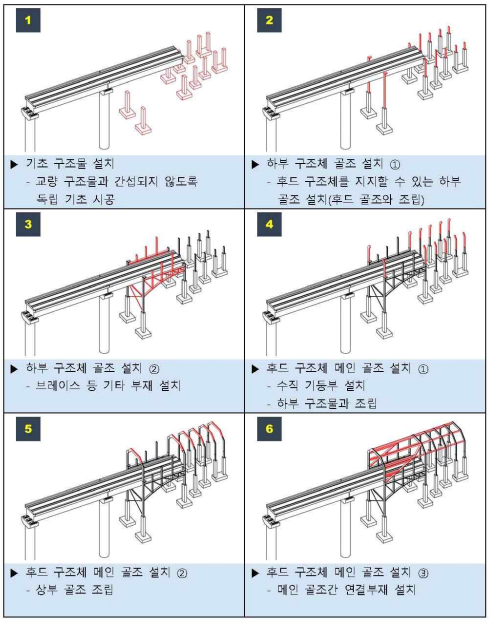
터널 현장에 따라 선로의 중심이 터널 중심과 일치되지 않는 경우가 발생할 수 있으며, 설계 시 후드 중심은 단면 그림 A와 같이 터널의 중심과 일치되도록 설계해야 함.

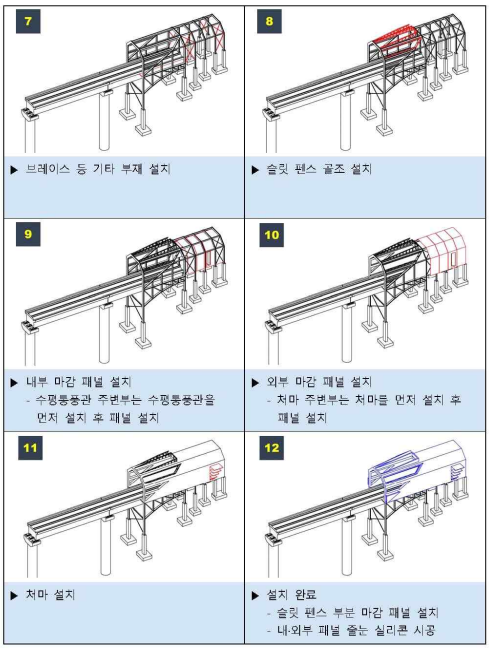
교량상부에 설치하는 후드 구조체의 내공단면적 크기는 터널 내공단면적의 1.554배를 적용하고 환경에 적합한 표준 모델을 선택하여 설치 할 수 있음.

후드 구조체의 내공단면적 크기 산정 시 중요한 바닥라인은 교량 하부의 지반이 아니라 그림의 B, C의 상부와 교량 위 궤도 상부가 이어지는 라인을 기준으로 계산해야 함.

그림의 B와 같이 후드와 교량 사이에 틈새가 발생하면 미기압파 저감 성능이 저하될 수 있으므로 반드시 기밀되도록 막아야하며, C부분은 강판 등으로 마감하여 안전통로(유지보수통로, walkway)로 활용할 수 있음. 즉, 후드 구조체와 맞닿는 교량 상부 전체는 반드시 기밀이 되어야 함.

2 설치 순서





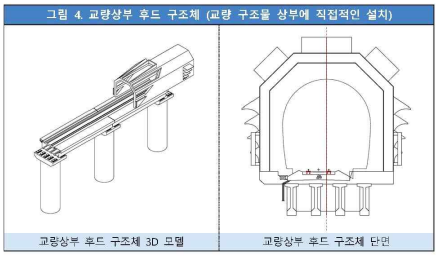
■ 교량 구조물에 후드 구조체 하중이 반영된 경우

현장 상황에 따라 그림과 같이 별도의 후드 기초 및 지지 구조물 없이 교량 구조물 상부에 후드 구조체를 설치해야 하는 경우가 발생할 수 있으며, 이와 같은 경우에는 후드 구조체의 하중이 교량 구조물에 직접적으로 영향을 주는 관계로 반드시 안정성 검토 후 교량 구조물에 대한 보강 작업을 실시해야 함.

후드 구조체의 내공단면적 크기 산정 시 중요한 바닥라인은 교량 하부의 지반이 아니라 그림과 같이 교량 구조물 상부(궤도 포함) 라인을 기준으로 계산해야 함.

설치를 위한 각 단계별 세부적인 사항은 본 매뉴얼의 Ⅳ장부터의 내용을 적용할 수 있음.

그림 4. 교량상부 후드 구조체 (교량 구조물 상부에 직접적인 설치)

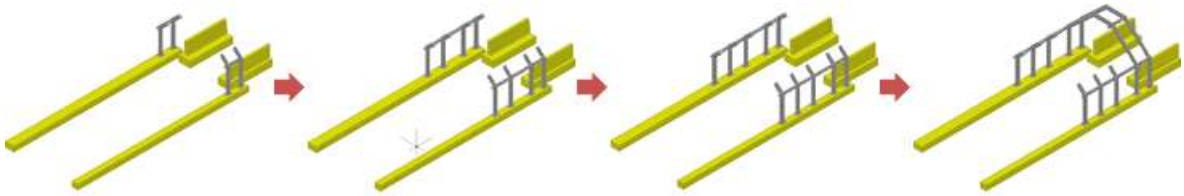


고량상부 후드 구조체 3D 모델 | 고량상부 후드 구조체 단면

다. 공용중 시공 방법의 적합성

(1) 후드 구조체 골조 설치 순서에 따른 적합성

○ 신설 선로 터널 후드 구조체 골조 설치 순서



<그림 2.2.1c 후드 구조체 시작품 골조 설치 순서>

- 철도종합시험선로에 설치된 후드 구조체 시작품의 골조는 그림 2.2.1c와 같이 기초 구조물 상부에 기둥 골조를 먼저 설치하고 지붕 골조를 조립하여 후드 구조체 골조를 완성하는 순서로 설치 현장에 작업장 확보가 어려운 경우 적용할 수 있는 방안임.

○ 공용 중 터널 후드 구조체 골조 설치 순서



<그림 2.2.2c 공용 중 후드 구조체 골조 설치 순서>

- 열차가 운행되는 공용 중 터널에서는 주간 시간대에 선로 위 후드 설치 작업이 불가능하며 열차 운행이 중단되는 심야 시간대 약 3시간에 작업이 가능함.
- 심야 시간 설치 시에는 주간 설치와 동일한 순서를 적용할 경우 설치 기간이 약 3배 가량 소요될 것으로 예상되며 주·야간 작업이 병행되어야 함.
- 그림 2.2.2c는 공용 중 설치 시 적용이 가능한 골조 설치 순서를 나타낸 그림이며, 주간에 작업장에서 메인골조 2개를 1세트로 사전 조립하고 야간에 조립된 골조를 인양 및 설치하는 방법으로 야간 시간대에는 표 2.2.1c의 공정표에 따라 설치가 가능함.
- 마감패널의 공용 중 설치 시에는 패널 마감을 위한 2차 부재와 패널을 모듈화하여 사전 조립 후 야간 3시간 동안 설치하는 방안을 적용해야 할 것으로 판단됨.
- 따라서, 주·야간 작업이 병행이 되는 공정 적용 시 작업에 소요되는 예상 기간은 터널 환경에 따라 달라 질 수 있지만 철골 부재 설치 공사 약 2~3주, 마감패널 설치 공사 약

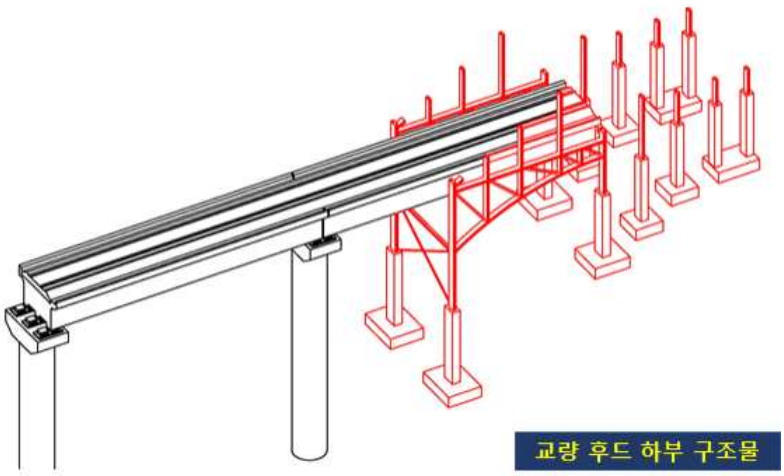
5~6주로 예상이 되며 신설 선로 작업 설치 방안 대비 동일하거나 더 단축될 것으로 예상되어 후드 구조체의 공용 중 현장 시공 기간 90일 이내 설치가 가능할 것으로 분석됨.

- 또한, 본 설치 방안은 신설 선로 구간에도 적용이 가능함.

<표 2.2.1c 공용 중 골조 설치 야간(1일 3시간) 공정>

세부 공종(철골 2열 1세트 설치)	시간(심야)	소요시간	작업위치
철도선로 위 조립부재 1세트 인양	1:00 - 1:30	30분	선로 위
볼트 조임 등 설치 및 검사	1:30 - 3:30	120분	선로 위
마감 작업	3:30 - 4:00	30분	선로 위

(2) 교량상부 설치 후드의 공용중 시공 방법의 적합성



<그림 2.2.3c 교량상부 후드 구조체 하부 구조물>

- 교량상부 후드 시공법에 대해 본 연구에서는 그림과 같이 교량 구조물과 간섭없이 후드 구조체를 설치하는 방법을 제시하고 있으며, 교량 양 옆으로 설치되는 후드 구조체의 하부 구조물은 공용중 노선에서도 열차 운행에 지장을 주지 않고 주간 작업이 가능함.
- 교량 높이까지의 하부 구조물 설치 이후부터는 후드 구조체의 메인 골조가 선로 상부 위에 설치되며, 2차년도에 개발된 주・야간 공정표 적용이 가능하고 하부 구조물 설치는 약 1주일이 소요될 것으로 분석됨.
- 일반적인 지반 위 설치 공정에서와 동일하게 주・야간 설치 공정표를 적용할 경우 철골 부재 설치 공사 약 2~3주, 마감패널 설치 공사 약 5~6주로 예상되며, 하부 구조물 설치 추가로 인해 전체 공용중 현장 시공 기간은 90일 이내 설치 가능한 것으로 분석됨.

(3) 터널 갱구 외부 지형 환경별 후드 구조체의 공용중 시공성 향상 방안 검토

○ 표준형 후드 구조체 적용 가능 터널 선별 및 지형 환경별 시공성 향상 방안 검토

- KTX 강릉선 현장 조사 결과 터널 입구 지형 환경을 표 2.2.2c와 같이 5가지로 분류할 수 있으며 각 지형별 후드 구조체 설치를 위한 지형적 특징 및 시공 방안을 분석하였음.

<표 2.2.2c 터널 입구 지형 환경별 유형 분류>

터널 입구 지형환경 유형 및 특징		
유형	**유형별 현장 모습**	**특징**
좌·우 모두 평지 지형		• 터널 입구 좌·우측 모두 평평한 지형으로 시공성이 가장 좋은 환경임 • 진입로 및 작업공간 확보에 유리하고 기초 구조물 조성에도 작업이 수월함
좌·우 모두 사면 지형		• 터널 입구 좌·우측 모두 사면으로 둘러싸인 지형 으로 후드 구조체 설치 공간 확보를 위한 사면 절토에 대한 사전 검토가 필요함 • 사면 절토를 위한 장비 반입 시 공간 제약으로 소형 장비 사용이 요구될 수 있음
좌·우 한쪽 사면 지형		• 터널 입구 한쪽 면이 사면인 지형으로 후드 구조체 설치 공간 확보를 위한 사면 절토에 대한 사전 검토가 필요함
교량 지형		• 교량 상부에 후드 구조체를 설치해야 하는 유형으로 교량 구조물에 직접적인 부담을 주지 않는 시공법 적용 • 터널 입구까지의 진입로 및 작업장 확보 필요
기타		• 계곡 등의 지형으로 후드 구조체 설치가 불가능한 것으로 판단되는 지형으로 진입로 및 작업공간 확보 불가능 (예_KTX 경강선 진조터널 시점) • 터널 입구까지의 진입로 및 작업장 확보 필요

(4) 강구조 및 콘크리트 후드 구조체 비교

- 일본 신칸센 터널의 경우 신규 노선(큐슈 신칸센, 홋카이도 신칸센)인 경우에는 콘크리트로 제작된 후드를 다수 살펴볼 수 있으며 콘크리트 후드는 공용중 선로 시공이 어려운 단점이 있는 반면, 본 과제에서 개발한 후드와 같이 강구조를 사용한 후드는 공용중 및 신선 선로 모두 적용이 가능함.
- 강구조 및 콘크리트 후드의 자세한 특성 비교는 표 2.2.3c에 나타내었음.

<표 2.2.3c 강구조 및 콘크리트 후드 특성 비교>

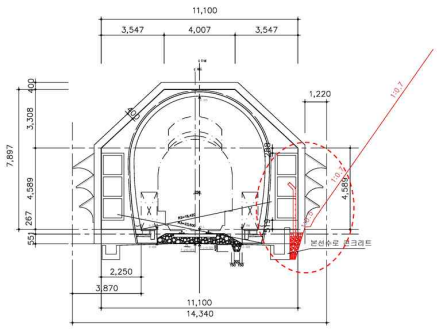
구분	강구조 후드 (Steel-frame Structure)	콘크리트 후드	
		Reinforced Concrete	Precast Concrete
형상			
시공성	• 공용중 및 신선 선로에 시공 가능 • 건식공법으로 공장 제작 및 조립이 가능 - 콘크리트 후드 대비 공기 단축 • 구조물의 다양한 형상(곡선, 아치 등)에 대응 가능하며 정밀한 제작 및 마감처리가 가능함 • 내·외부 마감재 탈부착 등 추가 마감공사의 대응이 용이함 • 설치 시 검사 용이	• 공용중 선로 적용 어려움 - 신선 선로 적용 가능 • 습식공법(현장제작) - 양생 등으로 시공 기간이 길고, 절차가 복잡함 • 구조물 형상 변화에 취약함 • 타공패널 등 미기압파 저감을 위한 추가 마감공사에 대한 대응이 어려움	• 공용중 선로 적용 어려움 - 신선 선로 적용 가능 • 공장제작이 가능하고, 연결부등 일부 습식공법 적용 • 구조물 형상 변화에 취약함 • 타공패널 등 미기압파 저감을 위한 추가 마감공사에 대한 대응이 어려움 • 운반 및 설치 시 파손 우려 - 양생 등으로 인해 시공기간이 길고,절차가 복잡
유지관리	• 내구성이 뛰어난 징크패널 적용으로 RC에 뒤쳐지지 않는 성능 확보가 가능하며 색상 변화가 없는 등 유지관리 용이	• 내구성 확보 가능 • 온도환경에 민감 • 균열 관리 필요 - 유지관리 어려움	• 내구성 확보가 가능 • 균열 관리 필요 - 유지관리 어려움 • 연결부 관리 필요

라. 철도시스템(궤도, 전기, 신호 등)의 인터페이스 경합요건 검토

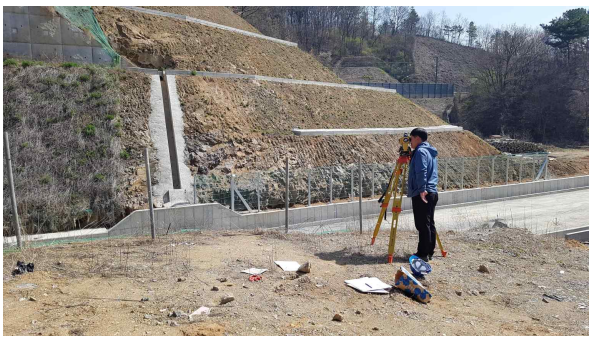
(1) 후드 구조체 시작품 설계 및 시공 과정에서의 인터페이스 경합요건 검토

- TEST-BED 대상지인 철도종합시험선로 시험 제5터널 시점에 미기압파 저감 후드 구조체를 설치하기 위해 설계 및 시공단계에서 기존 철도시스템과의 간섭사항을 사전 검토 후 철도종합시험선로 사업의 발주처 및 시공사와 협의를 통해 문제를 해결함.
- 간섭사항 파악을 위해 1차년도에는 현장조사 및 설계도면을 검토하여 후드 구조체 설계안에 반영하였으며, 2차년도에는 설치 공사를 진행하는 과정에서 발생하는 간섭에 대해 발주처 및 시공사 등 관계 기관과의 협의를 통한 설계변경으로 현장에서 문제를 해결함.

○ 사면



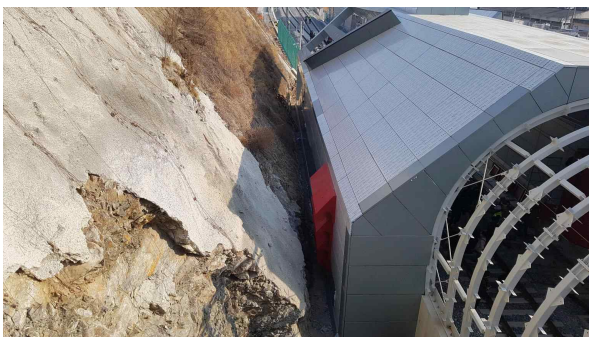
(a) 배치 도면 검토



(b) 현장 측량을 통한 간섭 검토



(c) 사면 추가 절토를 통한 간섭 해결

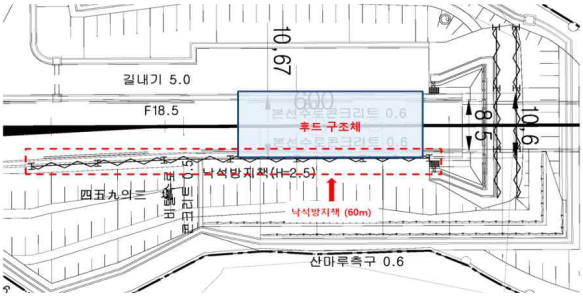


(d) 간섭 해결 및 설치 완료

<그림 2.2.1d 사면 간섭 검토 및 해결>

- 시험 제5터널 시점 우측면에는 그림 2.2.1d와 같이 사면이 위치하며 설계도면 검토 시에는 후드 구조체와 간섭이 발생하지 않는 것으로 확인하였음.
- 후드 구조체 설치 공사 시작 전 실시한 현장 측량 결
-
- 과, 사면과 후드 구조체 간 간섭이 확인되었으며 철도종합시험선로 시공사와의 협의를 통해 추가 절토 작업을 진행하여 문제를 해결함.

○ 낙석방지책



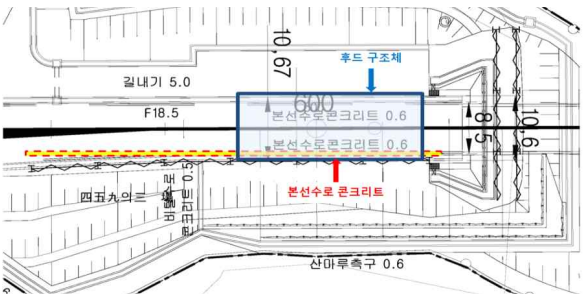


(a) 설계도면 검토 - 간섭 발생 (b) 간섭 해결 및 설치 완료

<그림 2.2.2d 낙석방지책 간섭 검토 및 해결>

- 시험 5터널 입구부 우측면의 사면으로 인해 낙석방지책이 돌출형 옹벽에서부터 약 60m 구간에 설계되어 있으며, 설계도면 분석 결과 후드 구조체와 간섭이 있음을 확인함.
- 후드 구조체는 철골 부재와 아연 패널 마감으로 낙석방지책 보다 내구성이 우수하여 낙석 발생 시 궤도 안으로의 낙석 유입을 방지 할 수 있어 감리단 및 시공사와의 협의로 후드 구조체 설치 구간에는 낙석방지책 설치하지 않는 방안으로 협의함.

○ 본선수로 콘크리트





(a) 배치도면 검토 - 간섭 발생 (b) 간섭 해결 및 설치 완료

<그림 2.2.3d 본선수로 콘크리트 간섭 검토 및 해결>

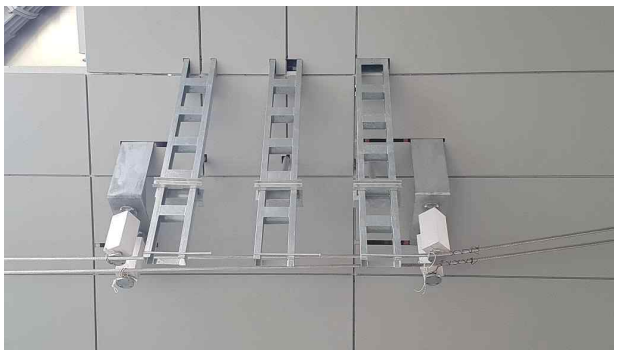
- 시험 제5터널 내부로 이어지는 선로 좌·우측에는 궤도 및 주변 사면으로부터 유입되는 빗물 등의 배수를 위한 본선수로 콘크리트 구조물이 설계되어 있었으며 후드 구조체와 설치 시 간섭이 발생함.
- 간섭 해결을 위해 본선수로 콘크리트가 후드 구조체 내부에 위치하도록 후드 구조체의 너비를 현장에 맞게 조정하고 설계 요구사항인 1.557배의 터널-후드 내공단면적비가 유지되도록 단면을 설계하였으며,철도종합시험선로 시공사와 협의하여 후드 기초와 일체형으로 설치함.

○ 전차선 및 급전선 지지대

- 전차선 및 급전선 지지대 위치 변경 없이 문제를 해결하기 위해 철도종합시험선로 시공사와 협의를 통해 지지대를 후드 구조체 골조에 설치할 수 있는 구조물로 설계 변경하였으며 그림 2.2.4d와 같이 총 3개의 전차선 및 급전선 지지대가 설치됨.
- 지지대 설치를 위해 당초 계획된 기초 구조물은 향후 후드 구조체 해체 등의 상황을 대비하여 후드 구조체 내부 지반에 시공되었으며, 후드의 미기압파 저감 성능에는 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었음.



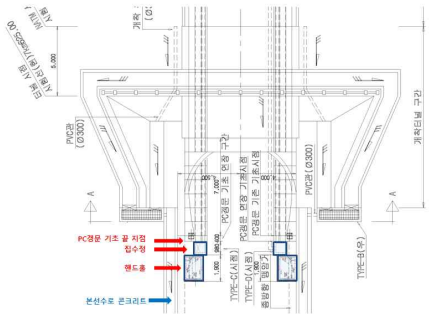
(a) X6~X7열 사이 급전선, 전차선 지지대 설치



(b) 패널 마감 및 설치 완료

<그림 2.2.4d 전차선 및 급전선 지지대 간섭 검토 및 해결>

○ 핸드홀 및 집수정



(a) 간섭 해결을 위한 설계 변경



(b) 간섭 해결 및 설치 완료

<그림 2.2.5d 핸드홀, 집수정 간섭 검토 및 해결>

- 핸드홀은 터널 및 PC갱문의 내부 공동구와 외부 트라프의 연결 통로 역할을 하는 콘크리트 구조물로 PC갱문 시점에 집수정과 함께 설치되도록 설계되어 있었음.
- 설계도면 확인 결과, 본선수로 콘크리트 안쪽으로 설계되어 있어 후드 구조체와의 간섭은 해당사항 없었으나, PC갱문 기초와 400mm 간섭이 발생하여 그림 2.2.5d의 (a)도면과 같이 간섭 해결을 위해 핸드홀과 집수정을 PC갱문 기초 앞으로 400mm이동하여 설치하는 것으로 설계를 변경하고 그림 2.2.5d의 (b)와 같이 설치됨.

(2) 교량상부 후드 설치 시의 인터페이스 경합요건 검토

○ 전차선 및 급전선 지지대

- 그림 2.2.6d와 같이 교량 상부 또는 터널 입구와 교량 사이에 전차선 및 급전선 지지대가 설치된 사례들이 있으며, 후드 구조체 설치 시 간섭이 발생할 경우 관할 기관과의 협의를 통해 전차선 및 급전선 지지대의 이전 설치 또는 후드 구조체 골조와 연결 설치 등의 방안으로 문제 해결이 가능함.



<그림 2.2.6d 철도 교량 전차선 설치 사례>

○ 안전펜스

- 그림 2.2.7d와 같이 철도 교량 상부 좌・우측에 안전펜스가 설치되어 있으며, 안전펜스 유・무에 따라 후드 내공단면적의 크기가 다르게 계산될 수 있고 안전펜스로 인한 미기압파 저감 성능에 영향을 미칠 수 있음.
- 후드 구조체 설치 시 후드 벽체가 안전펜스의 역할을 할 수 있으므로 후드 설치 구간에는 안전펜스를 철거하여 문제를 해결할 수 있음.



<그림 2.2.7d 철도 교량 안전펜스 설치 사례>

○ 교량 점검 사다리

- 철도 교량에는 시설물 점검 등의 목적으로 출입 사다리가 교각마다 설치가 되어 있으며, 후드 설치 구간에서는 간섭이 발생할 것으로 분석됨.
- 후드 구조체 설계 단계에서 후드 내부에서 교각으로 이동할 수 있는 수직형 사다리, 후드 내부에서 외부로 이어지는 개구부 또는 사다리 설치 등의 방안으로 문제 해결이 가능함.





<그림 2.2.8d 철도 교량 점검 사다리 설치 사례>

○ **교량 토공 구조물**

- 교량이 설치된 지반에는 그림 2.2.9d의 도면과 같이 교량 교각과 관련된 기초 등 토공 구조물이 매설되어 있으며, 후드 구조체 설치 위치에 따라 간섭이 발생할 수 있음.
- 특히, 후드 구조체 지지를 위한 별도 기초 구조물 설치가 필요한 경우 사전 현장 조사 및 교량 설계 도면 검토를 통한 환경 분석이 필수로 요구되며, 간섭이 발생하지 않도록 후드 설계 단계에서 해결 방안의 반영이 필요함.



<그림 2.2.9d 교량 하부 토공 구조물 분석 사례>

○ **신호기**

- 그림 2.2.10d와 같이 터널 입구와 교량 사이에 신호기 등의 철도 시설물이 설치되어 있는 곳이 다수 조사되었으며, 후드 구조체와의 간섭 해결을 위해 위치 이동 또는 후드 구조체 내부에 위치하도록 설계 단계에서 검토가 필요함.

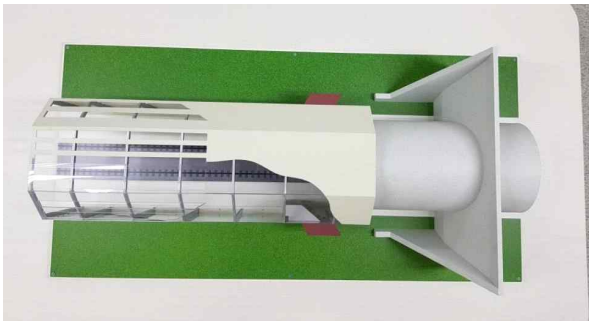


<그림 2.2.10d 교량 인접 터널 입구 신호기 설치 사례>

마. 후드 구조체의 시작품 제작 시공

(1) 후드 구조체의 1/40 및 1/60 축척 시작품 제작

- 후드 구조체 축소 모형은 1차년도 설계 완료 후 1/40 축척의 1차 시제품을 제작하였으며, 2차년도에는 설계 변경 내역이 반영된 최종 설계 도면을 바탕으로 1/60 축척의 2차 시작품을 최종 제작함.

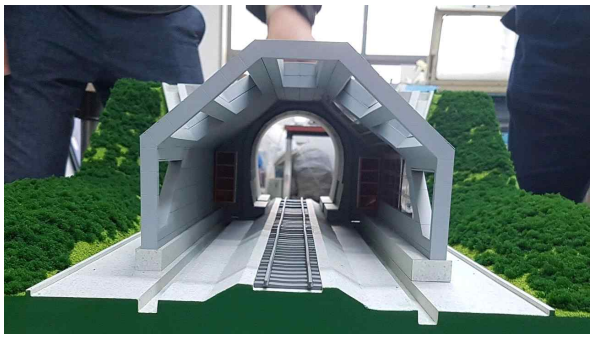


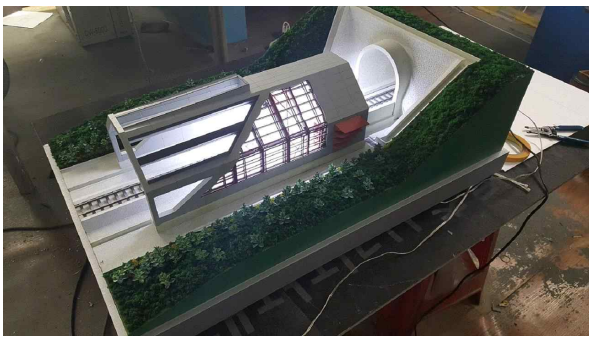

<그림 2.2.1e 1/40 축척 후드 구조체 1차 시작품>

- 시작품은 수평통풍관, 처마 등의 후드 구조체의 모든 시설물을 실물 그대로 표현했을 뿐만 아니라 철도 레일, 배수로, PC갱문 등의 TEST-BED 대상지인 철도종합시험선로 현장의 철도 관련 시설물을 함께 구현하여 터널 현장에 설치 시 모습을 상세하게 관찰할 수 있음.
- 2차 시작품은 후드 구조체 골조 부분을 더욱 상세하게 구현하였으며, 일부 구간은 탈착식으로 제작하여 후드 내부 골조까지 관찰이 가능함.



(a) 실제 터널 주변 환경 구현


(b) 후드 내부 구조 및 철도 시설물 구현


(c) 내부 LED 조명 설치


(d) 후드 구조체 골조 표현

<그림 2.2.2e 1/60 축척 후드 구조체 2차 시작품>

(2) 철도종합시험선로 후드 구조체 시작품 시공

- 1차년도 완료된 설계 도면을 바탕으로 2차년도에는 일부 설계변경 사항을 반영하여 최종 설계 도면을 완성한 후 실물 스케일의 미기압파 저감 후드 구조체를 TEST-BED 대상지인 오송 철도종합시험선로 시험 제5터널 시점부에 설치하였음.
- 철도종합시험선로는 한국철도시설공단에서 발주한 사업으로 철도 핵심 분야별 단위성능평가 및 인터페이스 성능평가가 가능하고 국내·외 철도차량, 용품, 시스템의 성능평가에 대한 시험을 위한 목적으로 2014년 9월부터 시공하여 2019년 3월 준공됨.



<그림 2.2.3e TEST-BED 후드 구조체 설치 위치(철도종합시험선로 시험 제5터널 시점)>

- 후드 구조체 시작품 설치 공사는 다음의 (가) ~ (자)의 공정과 같이 현장 기초 공사, 철골 공장 제작, 현장에서의 조립 및 설치를 진행하였음.
- 후드 구조체 시작품 설치 공사와 철도종합시험선로 공사 일정이 동시에 진행이 된 까닭에 철도종합시험선로 시공사 및 감리단과의 사전 협의를 통해 일정을 조율하여 설치 작업을 시작하였으며, 공정 간섭이 발생한 경우 현장에서 협의하여 조정하였음.



<그림 2.2.4e TEST-BED 후드 구조체 시작품 완공 모습>

(가) 기초 공사

- 후드 구조체의 기초 구조물은 터널 전면 좌·우측에 본선수로 콘크리트와 함께 일체형으로 시공이 되었으며, 철도종합시험선로의 본선수로 콘크리트 공사 일정에 맞춰 1차년도에 선 시공함.



(a) 지반 및 사면 발파 작업 준비



(b) 발파작업 완료



(c) 터파기 완료 및 검측



(d) 철근 조립 및 하부 거푸집 설치



(e) 철근 조립 완료 및 검측



(f) 콘크리트 타설 및 양생



(g) 공사 완료 및 검측

<그림 2.2.5e 후드 구조체 기초 공사 과정>

- 2차년도 후드 구조체 설치 공사 전 일부 구간에 대한 설계 변경이 진행되었으며, 구조 검토 결과 기초 구조물에 대한 보강 의견이 도출되어 좌측 기초 구조물에 대한 보강 공사를 실시하였음.



(a) 천공 및 앙카 시공



(b) 철근 배근 및 거푸집 조립



(c) 콘크리트 타설 및 양생



(d) 기초 구조물 보강 공사 완료

<그림 2.2.6e 후드 구조체 기초 구조물 보강 공사>

(나) 철골 부재 공장 제작

- 후드 구조체 설계 도면 수정 완료 후 shop-drawing(제작 도면)을 작성하였으며, shop-drawing을 바탕으로 철골 부재들을 공장에서 사전 제작 및 가공함.
- 후드 구조체의 메인 골조는 연구 수행 중 개발하여 특허 등록한 성능 보강형 BUILT UP BEAM(2차년도 정성적 성과점검보고서 page 13-280 참조)을 적용하였으며, 현장에서는 설치에 필요한 조립 이외의 별도의 가공 작업이 없도록 생산에서부터 절단, 가공, 조립 등 전 과정이 공장에서 진행됨.
- TEST-BED 후드 구조체 현장 설치 전에는 후드 구조체 일부 구간에 대한 가조립을 공장에서 실시하여 제작 및 조립에 대한 오차 등을 점검하여 현장 시공성을 사전 검증함.



(a) 후드 구조체 가조립 완성



(b) 가조립 구조물 검측

<그림 2.2.7e 후드 구조체 공장 가조립 및 검측>



(a) 철골 부재 가공



(b) 공장 조립



(c) 공장 검수



(d) 도장



(e) 도막 측정



(f) 제작 완료 및 출고 준비

<그림 2.2.8e 철골 부재 공장 제작 과정>

(다) 후드 구조체 설치 전 현장 실측

- 후드 기초 구조물 보강 공사 완료 후 철골 부재 설치를 위한 현장 실측을 진행하였으며, 설치 공사 시 사면 등 주변 지형 환경 및 터널 시설물간 간섭사항을 검토하고 설계 도면과의 일치 여부를 확인함.



(a) 현장 실측 1



(b) 현장 실측 2

<그림 2.2.9e 철골 부재 설치 전 현장 실측>

(라) 진입로 공사 및 사면 추가 절토

- 현장실측 시 철도종합시험선로 시험 제5터널 현장은 터널 및 선로 공사로 인해 터널 시점부까지의 진입로가 확보되지 않은 상황이었으며, 후드 구조체 철골 및 마감패널 설치를 위한 크레인 등의 장비 및 차량 반입을 위해 임시 진입로 공사를 실시함.
- 또한, 현장 실측 결과 선로 우측 방향의 사면과 후드 구조체 외벽간의 간섭 및 설치 작업 공간 확보 불가의 문제점이 확인되었으며, 터널 시공사인 GS건설과 협의를 통해 사면의 안정성이 확보되는 범위에서 추가 절토를 실시하여 공간을 확보하였음.



(a) 진입로 공사

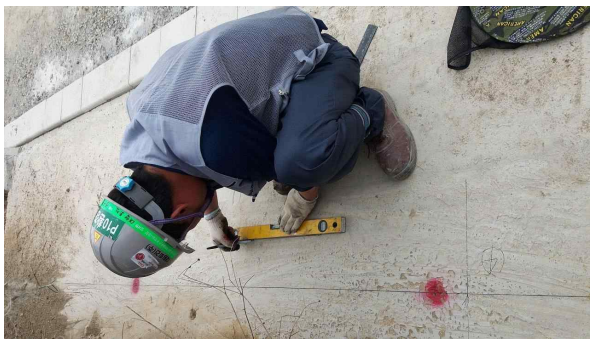


(b) 추가 사면 절토

<그림 2.2.10e 임시 진입로 및 사면 절토 공사>

(마) 골조 설치를 위한 케미컬 앙카 설치

- 현장 실측 후 후드 구조체 골조 설치를 위한 케미컬 앙카를 설계 도면에 따라 그림 2.2.11e의 과정과 같이 시공을 하였으며, 베이스플레이트는 골조 공장 제작 시 조립이 되며 현장 설치 시 사전에 시공된 케미컬 앙카 위치에 설치됨
- 설치된 앙카에 대해서는 현장에서 인발시험을 실시하여 시험성적서를 확보함.



(a) 앙카 설치 위치 확인 및 먹작업



(b) 천공



(c) 앙카 매입 및 약액 주입



(d) 앙카 인발시험

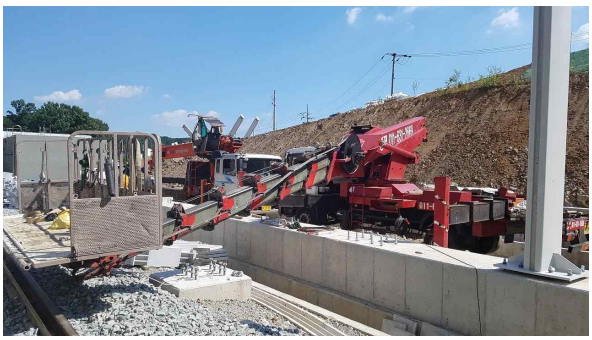
<그림 2.2.11e 앙카 설치 작업 과정>

(바) 후드 구조체 철골 부재 설치 공사

- 공장에서 제작 및 가공된 메인 골조 등의 철골 부재는 현장에서 조립/설치되며, 설치 순서는 터널에서 후드 시점 방향으로 진행하였음.
- 후드 구조체 시작품이 설치되는 시험 제5터널 시점에는 상부가 개방된 형태의 PC갱문 구조물이 설치되어 있으며, 미기압파 저감 효과를 위해서는 기밀을 위한 마감이 필수로 요구됨.
- PC갱문의 마감 공사를 위해 1차년도에 PC갱문 마감을 위한 구조설계 및 PC갱문 구조물에 대한 안전성 검토를 수행하였으며, 2차년도에는 골조공사만 진행하고 3차년도에 주관연구기관과 미기압파 및 구조 안정성 현장 시험 후 마감공사를 실시함.
- 시작품 설치 현장은 열차 운행이 없는 관계로 반입된 자재를 그림 2.2.12e의 (a)와 같이 후드 설치 위치와 가까운 선로 측면 및 터널 좌측 사면 상부 공터에 적치 하였음.



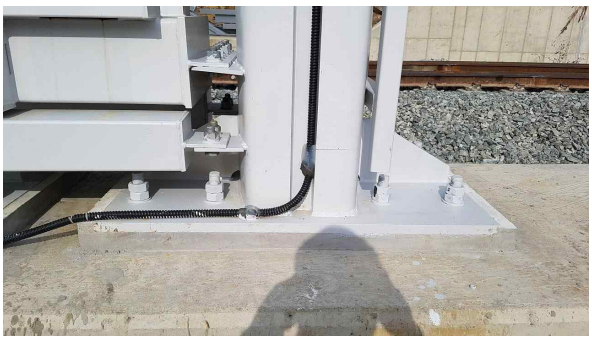
(a) 철골 부재 반입 및 적치



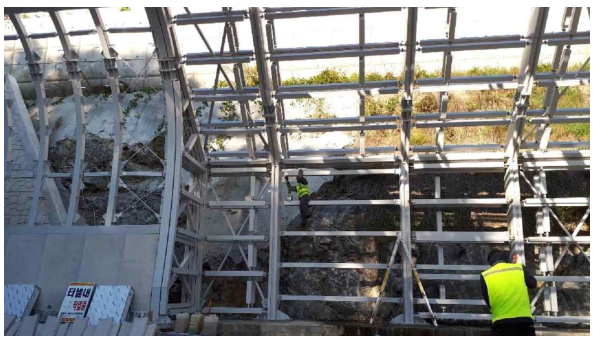
(b) 작업 장비 세팅



(c) 철골 부재 설치



(d) 베이스플레이트 무수축 몰탈



(e) 터치업 작업



(f) 설치 완료

<그림 2.2.12e 후드 구조체 철골 공사 과정>

(사) 접지 설비 공사

- 고압의 전선이 지나는 철도 시설물은 접지 설비가 설계 및 시공이 되어 있으며, 이와 같은 철도 시설물에 설치되는 강구조물 후드 구조체 역시 접지 설비가 요구됨.
- 이를 위해 후드 구조체는 철도종합시험선로의 접지와 연결하지 않고 독립된 접지 설비를 구축하여 요구 접지 저항값을 만족하였으며, 전문 업체 의뢰를 통한 접지 시스템 설계 및 설치를 실시함.
- 접지 설계는 전문 업체 용역을 통해 진행하였으며, 후드 구조체 시작품에 대한 구조 설계 검토 후 접지 설비 계산을 통해 요구 접지 저항값(10Ω)을 도출하고 필요한 저항값을 만족할 수 있는 접지 설비를 구축하기 위한 설계 도면을 작성함.
- 설치 후 측정된 접지 저항값은 4.77Ω으로 설계상 요구접지 저항값(10Ω 이하) 조건을 충족하였으며 설치과정은 그림 2.2.13e와 같음.



(a) 접지봉 매설을 위한 천공



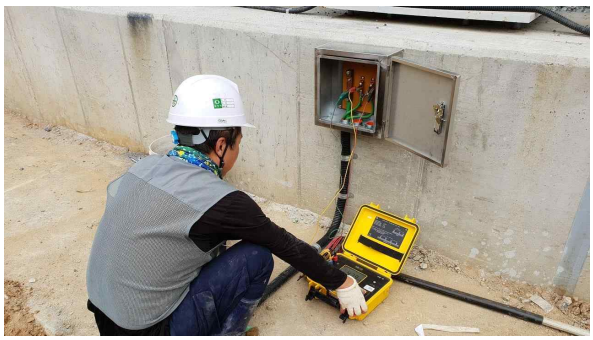
(b) 접지봉 매설



(c) 접지 저감재 타설



(d) 나동선 연결 및 매설



(e) 접지 단자함 설치 및 저항값 측정



(f) 후드 구조체 골조 및 접지 설비 연결

<그림 2.2.13e 후드 구조체 접지 설비 공사 과정>

(아) 후드 구조체 내·외부 마감 공사

- 후드 구조체의 마감을 위해 외부는 아연 소재의 징크 복합패널, 내부는 알루미늄 패널이 선정되었으며, 공장에서 가공 후 현장에서 설치하였음.
- 내·외부 패널 1판의 크기는 기본 2,500mm X 1,000mm 모듈로 제작되었으며, 그 외의 형상을 가진 부분은 실측 후 별도 제작하여 설치하였음.
- 후드 구조체 내부는 고속열차 통과 시 발생하는 열차풍이 직접적으로 영향을 미치는 부분으로 패널 탈락 등의 파손 방지를 위해 그림 2.2.14e의 (a)와 같이 패널 뒷면에 철골재로 보강을 하였으며, 결속 시에는 풀림방지 너트를 사용하였음.
- 설치는 기본적으로 내부를 먼저 설치하고 외부를 설치하는 방법으로 진행하였으나 일부 구간은 현장에서 판단하여 동시에 진행하였으며, 1판의 패널 설치를 위해 작업조를 3인 1조로 구성하고 고소차를 사용하였음.



(a) 공장 제작 및 내부 패널 보강



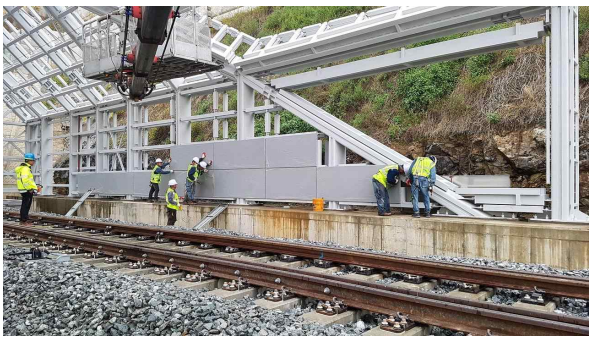
(b) 공장 검수



(c) 현장 반입 및 적치



(d) 현장 검수



(e) 내부 알루미늄 패널 설치



(f) 외부 징크 복합패널 설치

<그림 2.2.14e 후드 구조체 내·외부 마감 공사 과정>

(자) 후드 구조체 수평통풍관 및 처마 설치

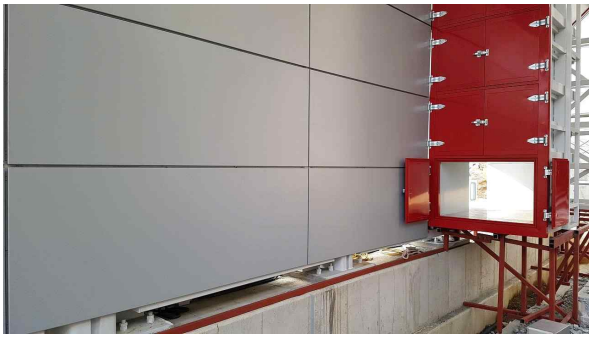
- 후드 구조체 내부에는 고속열차 진입 시 발생하는 미기압파를 외부로 방출하는 수평통풍관 설비가 좌·우에 하나씩 설치가 되며, 하나의 수평통풍관은 4개의 칸으로 설계되어 있음.
- 수평통풍관의 형상, 내공단면적, 각도 등의 기본 제원은 주관연구기관의 시험 결과에 따른 지침을 설계에 반영하여 최종 제작함.
- 수평통풍관의 외부 배출구는 후드 구조체 외부 마감라인과 동일 선상에 위치하게 되며, 외부 배출구로 눈, 낙석 등의 이물질 유입 방지를 위한 처마를 설계 및 설치함.
- 후드 구조체 처마는 공장에서 사전 제작 후 현장에서 설치하였으며, 수평통풍관과 처마의 설치과정은 그림 2.2.15e와 같음.



(a) 수평통풍관 공장 제작 후 현장 반입



(b) 현장 설치



(c) 개폐장치(Door) 조립



(d) 마감재 설치



(e) 처마 공장 제작 후 현장 반입

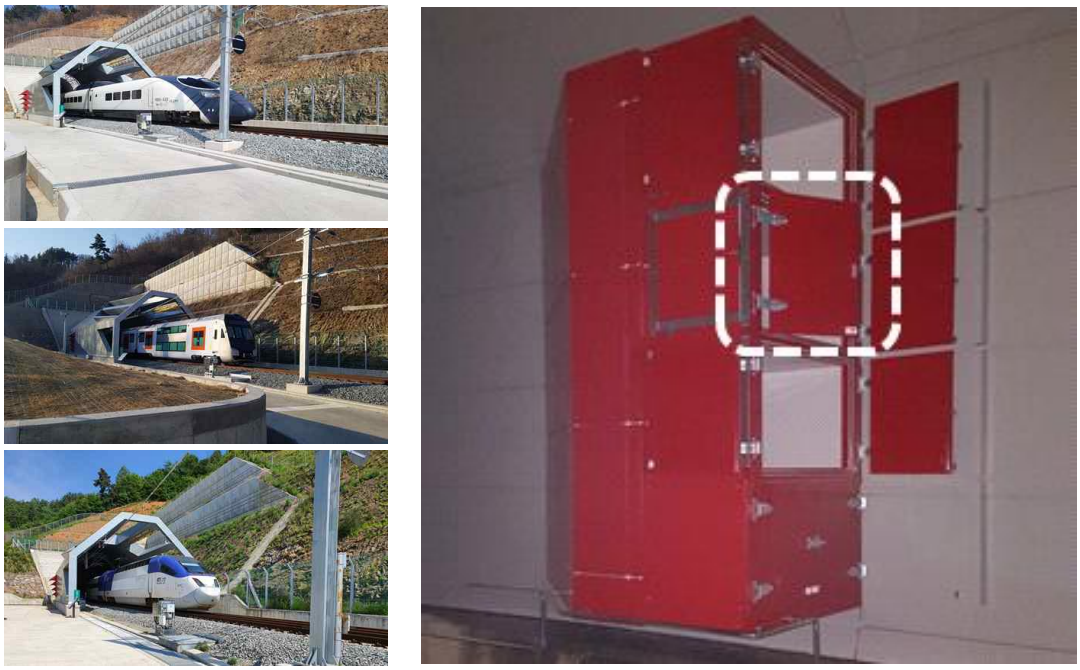


(f) 처마 현장 설치

<그림 2.2.15e 수평통풍관 및 처마 설치 과정>

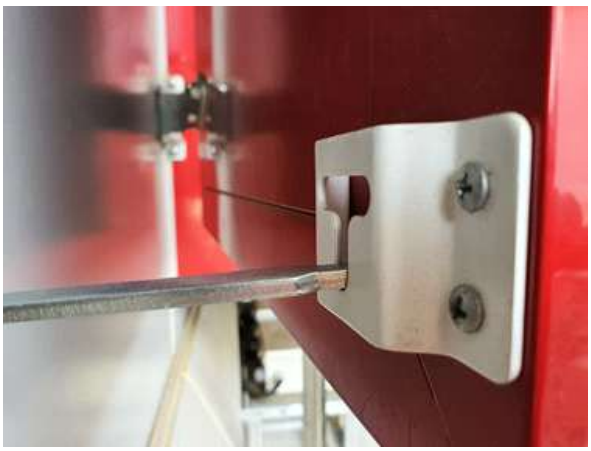
(3) 후드 구조체 수평통풍관 Door 개폐장치 개선

- 후드 구조체 시작품을 설치한 TEST-BED 철도종합시험선로에서는 후드 설치 직후인 2019년 3월부터 주행 성능시험 등을 위해 다양한 종류의 열차 운행을 시작하였으며, 후드 구조체를 통과하는 과정을 통해, 열차 운행 시 후드 구조체의 문제점을 관찰할 수 있었음.
- 이 과정에서 그림 2.2.16e와 같이 열차풍으로 인한 개폐식 Door의 잠금장치(T-Bar)가 해제되는 문제가 발견되었으며, 2중 잠금장치(U형 걸괴)를 적용하여 보완하였음.



<그림 2.2.16e 열차풍에 의한 고정장치 해제 문제 발생>

<표 2.2.1e 수평통풍관 개폐식 Door 고정장치 개선 전·후 비교>

Door 고정 장치 (개선 전)	Door 고정 장치 (개선 후)
	

바. 후드 구조체 시공 모니터링

(1) 기초 안정성 확인

○ 개요 및 검토 방법

- 1차년도 과제 평가 시 평가위원의 의견을 수렴하여 후드 구조체 기초에 대한 수치모델링을 통한 지반해석을 이용하여 기초의 안정성을 확인하는데 목적이 있으며, 토목설계 전문업체 용역을 통해 수행함.
- 지반해석을 통한 후드 구조체 기초안정성 검토는 기초 구조물 하부 원지반(경암)에 대한 침하안정성 검토가 목적이며, 유한요소 해석을 통한 변위 검토방법을 이용함.
- 검토를 위해 유한요소해석프로그램(SOILWORKS)을 이용하여 지반 및 구조체에 대한 모델링 및 수치해석을 수행하였으며, 다음 2가지의 하중 조건에 대한 해석을 진행함.
  - CASE 1 : 후드 구조체 하중
  - CASE 2 : 후드 구조체 하중 + 열차 운행하중

○ 해석 결과

<표 2.2.1f 지반해석 결과>

조건	위치	지지층	침하량(㎜)			부동침하			비고
			발생	허용침하	판정	발생 (각변위)	허용각	판정	
CASE 1	좌	경암	0.0304	15.0	O.K	0.0088㎜ ($7.3x10^{-7}$)	0.002	O.K	기초 간격 12m적용
	우	경암	0.0216	15.0	O.K				
CASE 2	좌	경암	0.0366	15.0	O.K	0.0095㎜ ($7.9x10^{-7}$)	0.002	O.K	기초 간격 12m적용
	우	경암	0.0274	15.0	O.K				

- 하중조건에 대한 기초지반의 침하량 및 부동침하에 대한 결과값 모두 허용값 이내로써 안정성에 문제가 없는 것으로 판단됨.
- 후드 구조체 기초지반이 견고한 경암지반이며, 하중 조건별 전체 하중값이 기초지반에 비해 상대적으로 크지 않음.
- 또한, 해외기준(ASCE 기준 허용값 3mm(경암))에도 만족하는 것으로 확인되어 안정성에 문제가 없는 것으로 판단됨.

(2) 후드 구조체 시작품 시공 모니터링

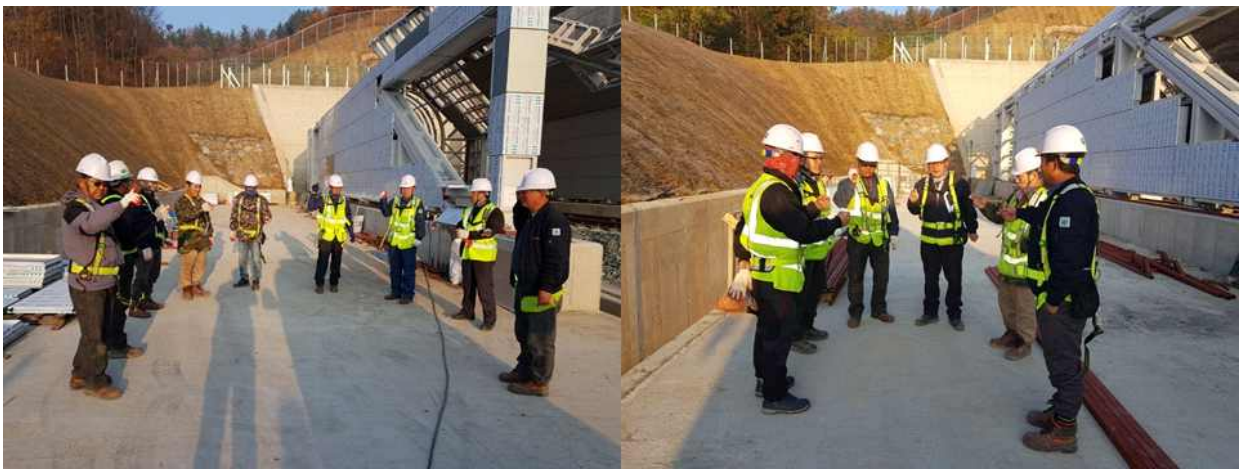
○ 후드 구조체 시공 과정 모니터링 환경 및 체계 구축

- TEST-BED 후드 구조체 시작품 설치 시 공장 제작, 기초 구조물 공사 등의 공정이 완료된 이후 현장에서 본격적인 후드 구조체의 설치가 이루어지는 골조 및 마감패널 설치 작업에 대한 모니터링을 실시하였음.
- 사전 작성된 설계도면, 시방서 및 설치 방안(매뉴얼)을 토대로 현장 시공팀과의 미팅을 통해 예정공정표를 수립하였으며, 설치 기간 동안에는 일일 작업 일보 작성을 통해 설치 진행 상황을 점검하였음.



<그림 2.2.1f 일일 작업 일보>

- 설치 현장에는 현장 감독관이 상주하여 진행상황을 총괄하였으며, 작업 시작 전에는 안전 교육 실시(1일 1회) 및 당일 작업 예정 사항을 간단하게 보고하여 후드 진행상황을 확인함.



<그림 2.2.2f 작업 전 안전 교육 실시>

- 또한, 현장에 상시 카메라를 설치하여 골조 및 마감패널 설치 과정의 전체적인 진행 과정을 기록하고 분석할 수 있었으며, 실시간 촬영으로 현장에서 발생할 수 있는 여러 가지 돌발 상황에 대한 즉각적인 대응 및 현장과의 소통이 이루어 질 수 있도록 환경을 구축하였음.



〈그림 2.2.3f 상시 촬영을 통한 설치 과정 실시간 모니터링〉

- 후드 구조체가 설치된 철도종합시험선로 시험 제5터널은 공용 중 터널이 아닌 신설 선로 공사가 진행 중인 현장으로 후드 구조체 설치 기간 중 공정간 간섭이 예상되었으며, 이에 대한 해결을 위해 설치 전 철도종합시험선로 사업 시공사와 협의를 통해 일정 일부를 사전 조율하였으며, 부득이하게 현장에서 공정 간섭이 발생한 경우에는 협의를 통해 양사 모두 일정을 조정하며 공사를 수행하였음.
- 상기 내용과 같이 후드 구조체가 설치되는 기간 동안 실시간 모니터링을 실시하여 후드 구조체 시공 과정에 대한 데이터를 확보할 수 있었으며, 사고 없이 안전하게 시공을 완료함.

○ 후드 구조체 골조 설치 주·야간 1일 공정 수립

- 후드 구조체 시작품의 시공 과정을 모니터링 데이터를 분석하여 1차년도에 사례조사를 통해 기 수립한 공용 중 설치 공정표를 수립하였음.
- 공용중 터널의 경우 선로 위에서 설치 작업을 할 수 있는 시간은 일반적으로 차량 운행이 없는 심야 시간대로 약 3시간이며, 후드 구조체 시작품이 설치된 시험 제5터널은 신설 사업으로 주간 선로 위 작업이 가능한 현장임.
- 후드 구조체 시작품의 구조는 10개의 메인 골조, 골조 사이를 연결하는 부재 그리고 마감패널 접합을 위한 부재들로 구성되어 있으며, 슬릿이 설치되어 있는 구간은 형상이 조금 상이하지만 후드 구조체의 메인 골조는 2개의 기둥 골조 및 1개의 지붕 골조가 현장에서 조립됨.
- 후드 구조체 시작품 골조 설치 작업은 기둥 골조들은 먼저 설치 후 지붕 골조와 골조 연결 부재를 설치하였으며, 마감패널 접합용 부재는 골조 설치가 일부 진행된 후에 후드 종점부에서부터 동시에 설치를 진행하였음.
- 모니터링 결과 후드 구조체 시작품 골조 설치를 위한 1일 평균 작업시간은 표 2.2.2f와 같이 정리할 수 있었음.

<표 2.2.2f 후드 구조체 시작품 골조 설치 주간(1일 8시간) 공정>

세부 공종(철골 2열 1세트 설치)	시간(심야)	소요시간	작업위치
안전교육 및 작업 준비	08:00 - 08:30	30분	선로 밖
기둥 골조 4개 설치	08:30 - 10:00	90분	선로 위
지붕 골조 2개 설치	10:00 - 11:00	60분	선로 위
골조 연결 부재 설치	11:00 - 12:00	60분	선로 위
마감패널 설치용 부재 (일부)설치	13:00 - 16:30	210분	선로 위
마감 작업	16:30 - 17:00	30분	선로 위

- 공용 중 시공 시에는 주간 및 야간 공정을 나누어 작업을 실시할 수 있으며, 주간에는 표 2.2.2f의 주간 공정표를 활용하여 작업장에서 2개의 기둥 골조 및 지붕 골조 1세트를 사전 조립하고, 야간에는 조립된 골조 1세트를 선로 위로 인양 및 설치할 수 있는 공정표를 다음과 같이 수립하였으며, 철골 부재 설치에 약 2~3주 정도 시간이 소요될 것으로 분석됨.(※터널 환경에 따라 달라질 수 있음)

<표 2.2.3f 공용 중 골조 설치 야간(1일 3시간) 공정>

세부 공종(철골 2열 1세트 설치)	시간(심야)	소요시간	작업위치
철도선로 위 조립부재 1세트 인양	1:00 - 1:30	30분	선로 위
볼트 조임 등 설치 및 검사	1:30 - 3:30	120분	선로 위
마감 작업	3:30 - 4:00	30분	선로 위

○ **후드 내·외부 마감패널 설치 야간 1일 공정 수립**

- 후드 구조체 시작품 마감패널 설치 공사의 1일 작업량 분석 결과, 3인 1조의 2개 그룹 총 6명이 1일 평균 40m^2 패널이 부착되었으며, 1시간 평균 5m^2의 패널을 설치하였음.
- 마감패널 설치와 관련된 현장 작업은 후드 구조체에 직접 설치하는 것으로 대부분의 시간이 선로 위에서 소요가 되며, 공용 중 시공 시 주간 설치작업은 불가능할 것으로 판단되며 하여 표 2.2.4f의 공정과 같이 야간 작업만 가능할 것으로 검토됨.

<표 2.2.4f 공용 중 마감패널 설치 야간(1일 3시간) 공정>

세부 공종(패널 15m^2 부착)	시간(심야)	소요시간	작업위치
선로 위 패널 이동 및 볼트 가조임	1:00 - 1:30	90분	선로 위
볼트 본조임 및 검사	1:30 - 3:30	60분	선로 위
선로 위 마감 작업	3:30 - 4:00	30분	선로 위

- 1일 3시간 작업으로는 작업량이 주간 대비 1/3 수준으로 낮아져 효율이 떨어질 것으로 판단되며, 공용 중 설치 시에는 패널 마감을 위한 2차 부재와 패널을 모듈화하여 사전 조립 후 야간 3시간 동안 설치하는 방안을 적용해야 할 것으로 판단됨.
- 이 경우 적용 터널의 여건에 따라 차이가 발생할 수 있으나 마감패널 설치 완료에 약 5~6주 기간이 소요될 것으로 분석됨.

(3) 후드 구조체와 터널 연결부(PC갱문) 설치 공사

- TEST-BED 후드 구조체 시작품은 2차년도 설치 당시 후드 유·무에 따른 터널 미기압파 저감 성능 검증을 위한 공기역학 시험을 위해 터널과 후드 구조체 사이에 위치한 PC갱문 마감하지 않았으며, 2019년 12월 1차 현장시험을 진행 후 PC갱문 공사를 시작하여 2020년 2월말 최종 완공하였음.

(가) 가설 및 안전시설 공사

- 후드 내부를 통과하는 전차선과의 간섭 및 고소차의 선로 내부 진입의 어려움으로 인해 가설 비계를 설치하여 철골부터 마감까지의 모든 작업을 수행하였으며, 비계 위에서의 작업 시 작업자의 낙상 사고 등의 방지를 위해 안전시설을 설치함.



(a) 내·외부 가설 비계 설치


(b) 전차선 보호망 등 안전장치 설치

<그림 2.2.4f 가설 공사 과정>

(나) 철골 공사

- 2차년도 후드 구조체 시작품 설치 시 PC갱문은 메인 골조만 설치가 되었으며, 이번 공사를 통해 메인 골조 사이의 마감 패널 부착을 위한 철골 부재 및 브레이싱 등 나머지 철골 공사를 그림 2.2.5f와 같이 수행함.


(a) 외부 철골 부재 설치


(b) 내부 철골 부재 설치

<그림 2.2.5f 철골 공사 과정>

(다) 내・외부 마감 패널 공사

- 후드 구조체와 동일하게 외부는 징크 복합패널, 내부는 알루미늄 패널로 마감하였으며, 패널 설치 완료 후 패널 사이의 줄눈은 실리콘 공사를 통해 기밀하게 마감 작업함.



(a) 외부 징크 복합패널 설치



(b) 내부 알루미늄 패널 설치



(c) 외부 마감 줄눈 실리콘 공사



(d) 내부 마감 줄눈 실리콘 공사

<그림 2.2.6f 내・외부 마감패널 공사 과정>

(라) PC갱문 마감 및 후드 구조체와 접합부 완공

- 그림 2.2.7f는 최종 완공된 PC갱문의 내・외부 전경임.



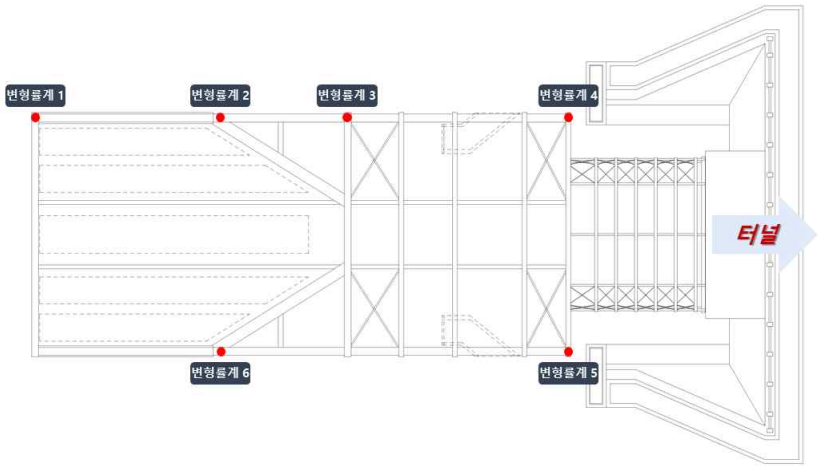


<그림 2.2.7f PC갱문 공사 완공>

사. TEST-BED 후드 구조체의 시험/평가

(1) 구조 안정성 모니터링 및 현장 시험의 목적

- 공용중 터널에 설치될 후드 구조체는 항상 외부에 노출이 되어 있어 풍하중, 태풍 등 다양한 외부 요인의 영향은 물론 고속으로 운행하는 열차의 열차풍 등으로 인해 변형이 발생할 수 있어 구조 안정성에 대한 검증이 필수로 요구됨.
- 본 연구에서는 후드 구조체 시작품의 구조 안정성 검증을 위해 1차년도에는 설계도면을 대상으로 구조해석을 진행하였으며, 2차년도에는 시공 과정에서의 구조 안정성 검증을 위해 골조 공사 완료 및 패널 설치 완료 단계에서 각각 변형률 계측을 실시하여 안정성을 확인하였음.
- 3차년도에는 TEST-BED에 설치 완료된 후드 구조체 시작품의 상시 및 열차 운행 시의 안정성 모니터링을 통해 구조 안정성을 검증하였음.
- 안정성 모니터링은 변형률계 센서를 통한 응력과 경사계 센서를 활용한 변위 변형 계측을 통해 진행하였으며, 그림 2.2.1g와 같이 각각 6개씩 설치하였음.

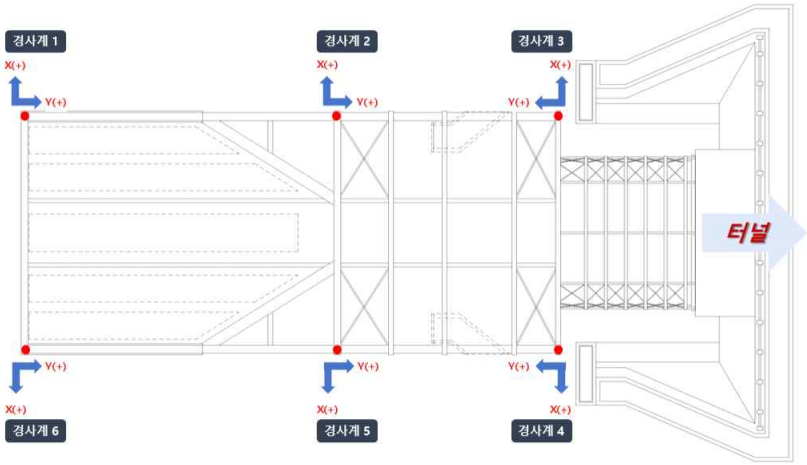


<그림 2.2.1g 변형률계 센서 설치 위치>



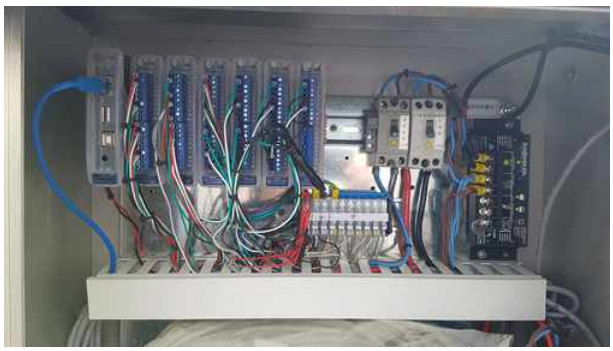
<그림 2.2.2g 변형률계 센서 구축>

- 변위 변형률에 대해서는 공인시험인증기관과 함께 시험을 진행하여 1% 이내 변형률의 안정성 검증에 대한 공인시험성적서를 발급받아 검증하였음.



<그림 2.2.3g 경사계 센서 설치 위치>





<그림 2.2.4g 경사계 센서 구축>

(2) 변형률 계측 방법

(가) 후드 구조체 안정성 모니터링(상시 계측)

- 응력 및 변위 안정성 모니터링은 2019년 5월 21일부터 2020년 2월 18일 까지 주 1회 총 40회(40일) 동안 오전 10시부터 오후 5시까지 하루 평균 7시간 동안 수행하였으며, 후드 구조체의 응력 및 변위에 대한 변형률을 측정하기 위하여 변형률계 센서 6개, 경사계 센서 6개 총 12개의 센서를 이용하여 변화량을 측정하였음.
  - 계측 빈도 : 1초당 1개의 데이터 계측
- 초기 기준값 설정을 위해 2019년 5월 14일 예비 테스트를 진행하여 응력은 7시간 동안 계측된 데이터의 평균값을 기준값으로 설정하였으며, 변위는 3번 경사계 센서의 케이블 연결 불량으로 5월 17일 최종 보완하여 당일 재실시한 테스트의 초기 측정값을 기준값으로 설정하였음.
- 변위 변형률 계측 결과에 대한 공인시험성적서 발급을 위해 경사계 센서는 2019년 5월 7일 현장에서 공인시험인증기관 담당자를 통한 센서의 정확도를 측정하여 검증 후 설치하였음.



<그림 2.2.5g 경사계 센서 현장 검증>



<그림 2.2.6g 상시 계측 진행 모습>

(나) KTX 고속열차의 후드 구조체 통과 시 안정성 시험(현장시험)

- 고속열차 열차풍의 영향 등 후드 구조체 통과 시의 구조 안정성 검토를 위해 2019년 12월12일, 2020년 4월 23일, 2020년 5월 21일 3차례에 걸쳐 KTX 산천 열차 운행을 통한 현장 시험을 진행하였으며, 총 44회 KTX 열차가 왕복(상행・하행) 운행함.
  - 계측 빈도 : 1초당 100개의 데이터 계측
- KTX 열차 통과 시 변형률 계측 시험은 다음의 과정과 같이 진행하였음.

① 종합통제실의 KTX 열차 발차 신호에 맞춰 계측 시작

② 열차의 후드 구조체 진입속도는 140 km/h ~ 200 km/h 로 설정

③ 열차의 후드 구조체 진입 시점의 시각 기록

※ 하행 시 후드 시점 진입 시점, 상행 시 후드 종점 진입 시점을 기록

④ 열차 통과 후 180초간 계측 지속 후 종료





<그림 2.2.7g 구조 안정성 검증 현장 시험 진행 모습>

(3) 계측 데이터 분석 방법

(가) 응력 데이터 변형률

○ 관리기준치 설정

- 후드 구조체 응력의 계측관리기준치는 구조계산서 상에 명시된 부재의 항복강도를 통해 계산된 허용인장강도를 기준으로 표 2.2.1g- 2.2.2g와 같이 관리기준치를 설정하였음.

<표 2.2.1g 후드 구조체 시작품 응력 계측 관리기준치 설정>

구분		관리기준치
변형률계	허용인장응력	허용 인장응력 157.00 MPa
	허용압축응력	허용 인장응력 157.00 MPa

<표 2.2.2g 변형률계 관리기준치>

설치 위치	계측시스템 ID	관리기준치 적용	관리기준치 (100%)
변형률계 1	DSG_01	상한(인장)	157.00 MPa
		상한(압축)	-157.00 MPa
변형률계 2	DSG_02	상한(인장)	157.00 MPa
		상한(압축)	-157.00 MPa
변형률계 3	DSG_03	상한(인장)	157.00 MPa
		상한(압축)	-157.00 MPa
변형률계 4	DSG_04	상한(인장)	157.00 MPa
		상한(압축)	-157.00 MPa
변형률계 5	DSG_05	상한(인장)	157.00 MPa
		상한(압축)	-157.00 MPa
변형률계 6	DSG_06	상한(인장)	157.00 MPa
		상한(압축)	-157.00 MPa

- 변형률계 센서는 $\mu\varepsilon$ 단위의 변형률 수치로 기록이 되며, 구조계산서에 명시된 강재탄성계수와 변형률계 센서의 보정값(게이지팩터)를 곱하여 응력으로 변환할 수 있음.
  ※ 강재탄성계수 : 205,000 MPa

- 후드 구조체 응력에 대한 상시 계측 데이터는,

- 2019년 5월 14일 계측한 데이터의 응력 평균값을 기준값으로 설정하고 모든 회차에 동일하게 적용함.
- 하루 평균 7시간 측정한 데이터를 응력으로 변환하여 기준값 대비 변화량의 최대값과 최소값을 구함.
- 최대값과 최소값의 관리기준치 대비 비율을 산정하고, 그 값의 관리기준치 범위 이내 분포 여부로 안정성을 판단함.

- 후드 구조체 변위에 대한 현장 시험 결과 데이터는,

- 열차의 후드 진입 10초전 시점의 1초 동안 측정된 데이터의 응력 평균값을 기준값으로 설정함.
- 열차 통과 후 10초간 측정한 데이터를 응력으로 변환하여 기준값 대비 변화량의 최대값과 최소값을 구함.
- 최대값과 최소값의 관리기준치 대비 비율을 산정하고, 그 값의 관리기준치 범위 이내 분포 여부로 안정성을 판단함.

(나) 변위 데이터 변형률

- 변위 데이터는 그림 12.3과 같이 경사계 센서를 통해 X축과 Y축 2개 방향에 대해 측정되며 1° 변화에 대해 0.004V로 기록됨.
- 지면으로부터 수직으로 설치된 후드 구조체의 철골 부재가 90° 각도로 거동할 경우를 100% 변형된 것으로 기준으로 설정하고 90° 대비 변형률을 계산함.

- 후드 구조체 변위에 대한 상시 계측 데이터는,

- 2019년 5월 17일 확인된 데이터를 기준값으로 설정하고 모든 회차에 동일하게 적용함.
- 하루 평균 7시간 측정한 데이터 중 기준값 대비 변화량의 최대값과 최소값을 구함.
- 변화량의 최대값과 최소값 중 기준값 대비 절대값이 큰 값을 구하여 변형률을 계산함

- 후드 구조체 변위에 대한 현장 시험 결과 데이터는,

- 열차의 후드 진입 10초전 시점의 1초 동안의 데이터 평균값을 기준값으로 설정함.
- 열차 통과 후 10초간 측정한 데이터 중 기준값 대비 변화량의 최대값과 최소값을 구함.
- 변화량의 최대값과 최소값 중 기준값 대비 절대값이 큰 값을 구하여 변형률을 계산함

(4) 계측 데이터 분석 결과

(가) 후드 구조체 시작품 응력 변형률 분석 결과

- 후드 구조체 시작품의 응력 변형률 계측을 위해 총 6개소에 변형률계 센서를 설치하고, 2019년 5월 14일 오전 10시부터 오후 5시까지 계측한 데이터 평균값을 기준으로 2019년 5월 21일부터 2020년 2월 18일까지 주 1회(하루 평균 7시간) 총 40회에 걸쳐 상시 계측을 실시하였음.

- 후드 구조체 6개소의 상시 계측 결과,

  DSG3에서 최대 17.704MPa(관리기준치 157MPa의 11.30%),

  DSG2에서 최소 -15.634MPa(관리기준치 -157MPa의 9.98%)이 계측됨.

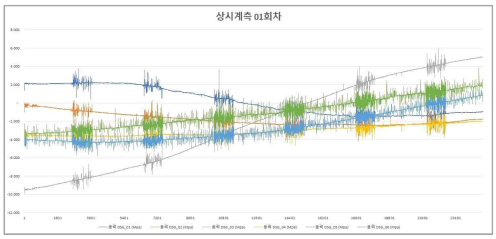
- KTX 고속열차 운행 시 후드 구조체의 응력 변형률 계측을 통한 구조 안정성을 확인하기 위해, 2019년 12월 12일, 2020년 4월 23일, 2020년 5월 23일 3차례 현장 시험을 진행하여 총 44회의 KTX 운행 시 계측을 실시하였음.

  • 후드 구조체 6개소의 현장 시험 결과,

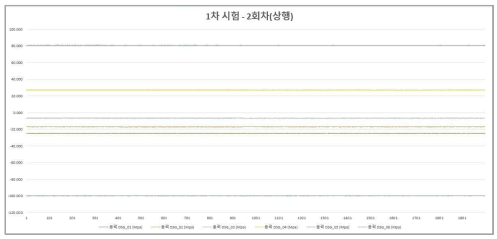
    DSG3에서 최대 15.140MPa(관리기준치 157MPa의 9.66%),

    DSG2에서 최소 -13.103MPa(관리기준치 -157MPa의 8.36%)이 계측됨.

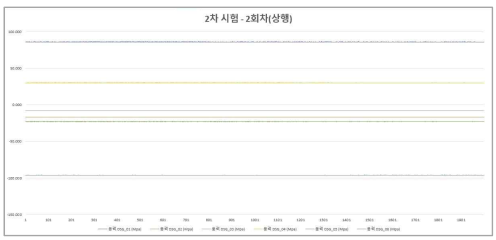
- 따라서, 상시 및 KTX 열차 운행 중 후드 구조체에 설치된 변형률계 계측 데이터 분석 결과 안정적인 계측값이 측정되고 있으며, 모든 센서에서 계측값이 관리기준치 이내로 나타나고 있으므로 응력에 큰 변화 없이 현재 안정한 상태에 있는 것으로 판단됨.



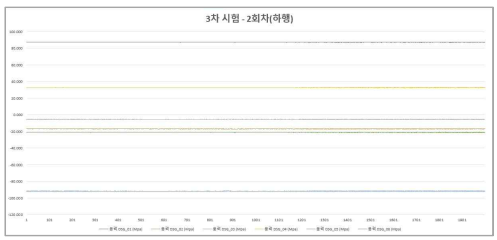
(a) 상시계측



(b) 1차 현장시험



(c) 2차 현장시험



(d) 3차 현장시험

<그림 2.2.8g 응력 변형률 계측 결과 (대표)그래프>

(나) 후드 구조체 시작품 변위 변형률 분석 결과

- 후드 구조체 시작품의 변위 변형률 계측을 위해 총 6개소에 경사계 센서를 설치 후 한국산업기술원(KTL)과 현장에서 정확도를 측정하였으며, 2019년 5월 17일 계측된 데이터를 기준으로 2019년 5월 21일부터 2020년 2월 18일까지 주 1회(하루 평균 7시간) 총 40회에 걸쳐 상시 계측을 실시하였음.

  • 후드 구조체 6개소의 상시 계측 결과 다음 표와 같이 모든 위치에서 최대 변위 변형률이 1% 이내로 발생함을 확인함.

<표 2.2.3g 경사계 센서별 최대 변위 변형률 - 상시계측>

구 분	[상시계측] 경사계별 X,Y 방향 최대 변형률(%)					
	경사계 1	경사계 2	경사계 3	경사계 4	경사계 5	경사계 6
X 방향	0.16	0.38	0.19	0.13	0.21	0.14
Y 방향	0.11	0.40	0.28	0.42	0.14	0.18

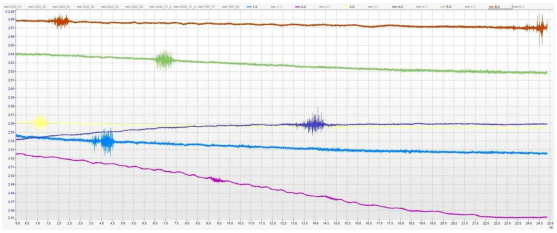
- KTX 고속열차 운행 시 후드 구조체의 변위 변형률 계측을 통한 구조 안정성을 확인하기 위해, 2019년 12월 12일, 2020년 4월 23일, 2020년 5월 23일 3차례 현장 시험을 진행하여 총 44회의 KTX 운행 시 계측을 실시하였음.

  • 후드 구조체 6개소의 현장 시험 결과 다음 표와 같이 모든 위치에서 최대 변위 변형률이 1% 이내로 발생함을 확임함.

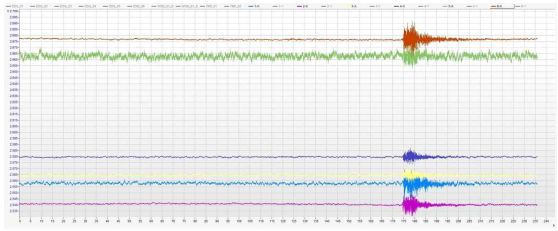
<표 2.2.4g 경사계 센서별 최대 변위 변형률 - KTX 현장시험>

구 분	[KTX 현장시험] 경사계별 X,Y 방향 최대 변형률(%)					
	경사계 1	경사계 2	경사계 3	경사계 4	경사계 5	경사계 6
X 방향	0.15	0.03	0.07	0.07	0.05	0.05
Y 방향	0.15	0.02	0.08	0.06	0.05	0.02

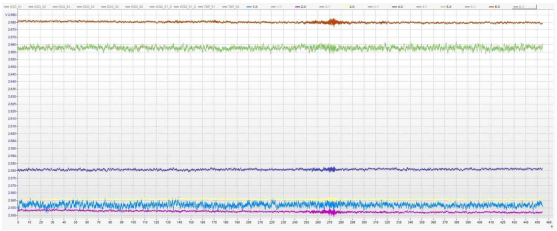
- 따라서, 상시 및 KTX 열차 운행 중 후드 구조체에 설치된 경사계 계측 데이터 분석 결과, 모든 위치의 센서에서 1% 이내의 변위 변형률이 나타나고 있으므로 변위에 큰 변화 없이 현재 안정한 상태에 있는 것으로 판단됨.



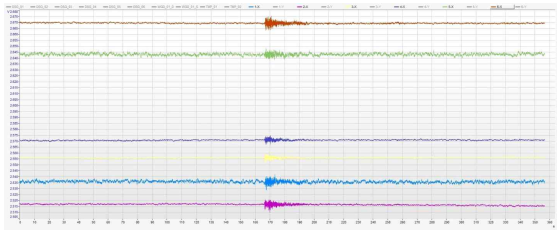
(a) 상시계측



(b) 1차 현장시험

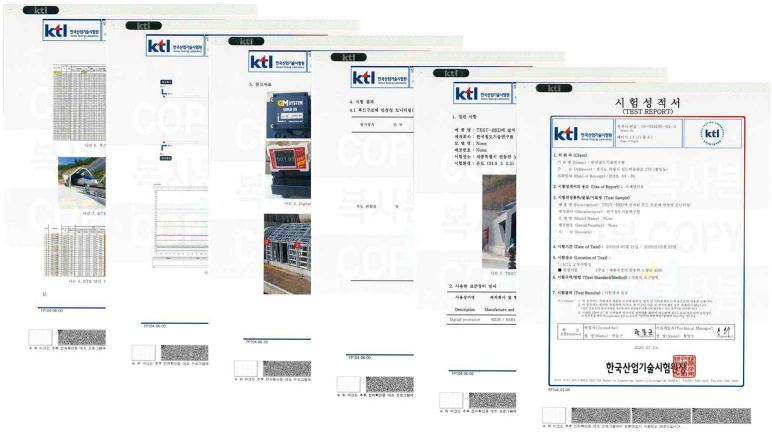


(c) 2차 현장시험



(d) 3차 현장시험

<그림 2.2.9g 변위 변형률 계측 결과 (대표)그래프>



<그림 2.2.10g 변위 변형률 계측 결과에 대한 KTL 공인시험성적서>

아. 고속화철도용 최적설계 도면작성

(1) TEST-BED 후드 구조체 시작품 설계도면

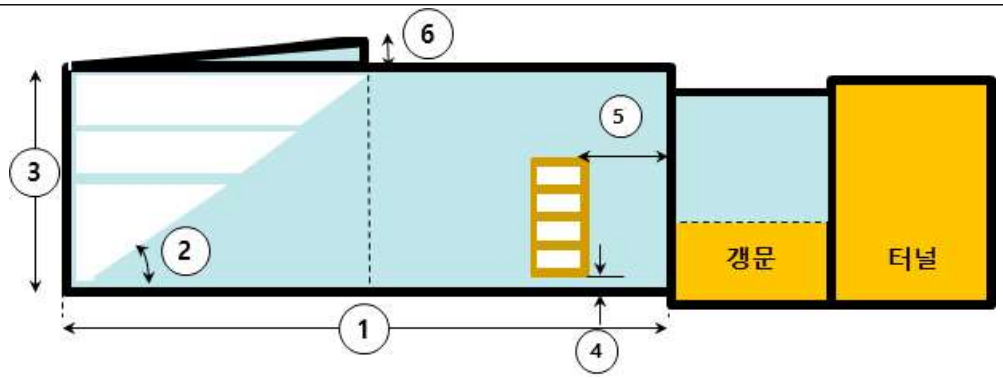
(가) 개요

- 본 연구과제의 후드 구조체는 **TEST-BED 대상지인 철도종합시험선로 시험 제5터널 시점부에 설치**되었으며, 해당 지역의 환경 등을 고려하여 설계되었음.
- 미기압파 저감 성능 구현을 위해 후드 구조체의 단면적, 길이, 수평통풍관 위치 등의 제원은 한국철도기술연구원의 축소 모델 시험 등의 해석 결과값을 반영하여 최적설계를 수행하였음.
- 1차년도에는 후드 단면 형상은 다각형을 기본으로, 슬릿형과 경사형 후드 구조체의 2가지 형태로 설계를 진행하였으며, 후드 단면적은 터널 단면적의 1.56배인 78.58m^2, 길이는 28m로 설계되었음. (※ 철도종합시험선로 시험 제5터널의 내공단면적은 50.27m^{2}임)
- 2차년도에는 슬릿형 후드 구조체를 최종 모델로 선정하고 한국철도기술연구원의 추가 시험을 통해 단면적은 터널 단면적의 **1.557배인 78.28m^2, 길이는 27m로 기본 제원이 일부 변경되었으며, 미기압파 저감 효과 증진을 위한 슬릿 개구율 및 형상 변경, 슬릿 펜스의 추가, 부재 크기 변경 등 설계 변경 후 최종 설치됨.**

(나) 후드 구조체 시작품의 주요 설계 제원

- 개발된 후드 구조체는 크게 내외부 마감패널, 수평통풍관, 슬릿, 슬릿 펜스로 구성되며, 2차년도에 완성된 최종 제원은 다음과 같음.

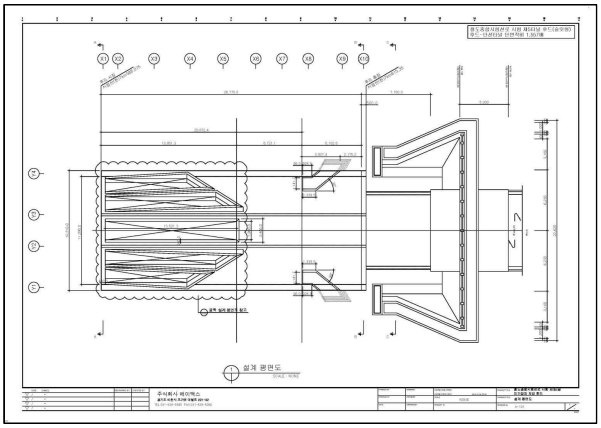
<표 2.2.1h 철도종합시험선로 시험 제5터널 후드 구조체 시작품의 주요 설계 제원>



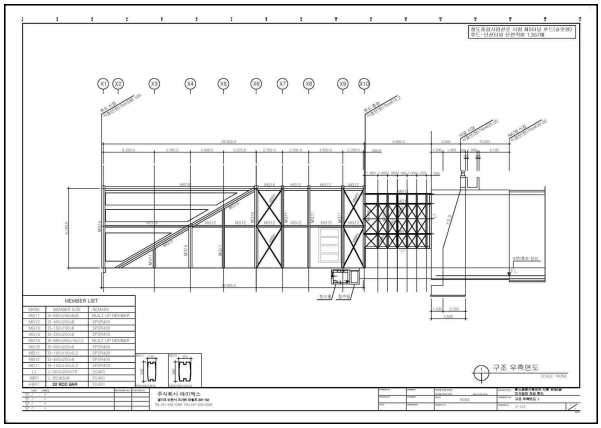
구분	기호	제원	비고
후드 길이 (후드 시점 ~ 종점 내벽 간)	①	26,775 ㎜	
슬릿 경사각도	②	30˚	
후드 높이(내측 기준)	③	8,764 ㎜	
바닥에서 통풍관까지 높이	④	550.7 ㎜	
통풍관(내측) - 후드 종점 내벽 간 거리	⑤	2,450.8 ㎜	
펜스 높이(후드 내부마감라인 ~ 펜스 상부 마감라인)	⑥	1,350 ㎜	

(다) 후드 구조체 시작품 설계도면집

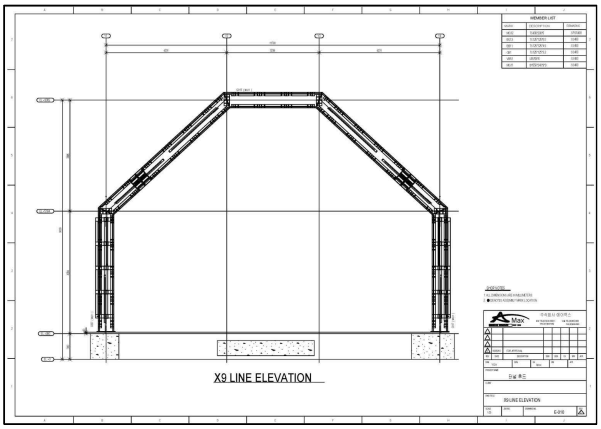
- 후드 구조체 시작품의 상세 설계도면은 2차년도 성과점검보고서(page 13-471) 참조



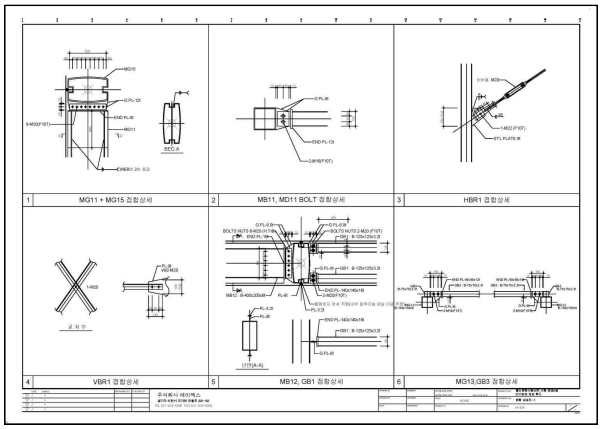
(a) 설계도면



(b) 구조도면



(c) shop-drawing



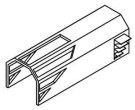
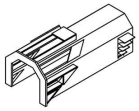
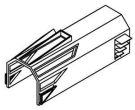
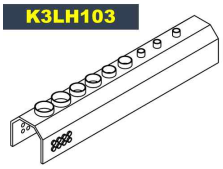
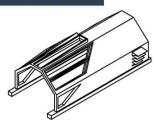
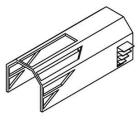
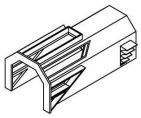
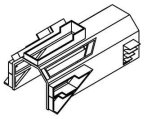
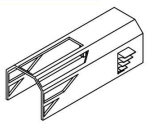
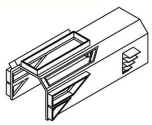
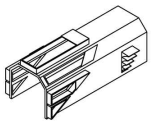
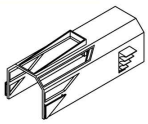
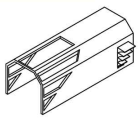
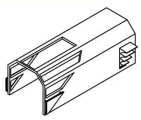
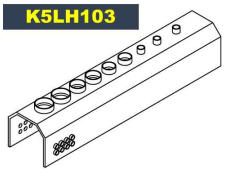
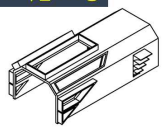
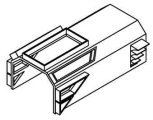
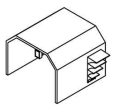
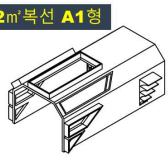
(d) 접합부 등 상세도면

(2) 단선터널 및 복선터널용 후드 구조체의 최적설계 도면

(가) 개요

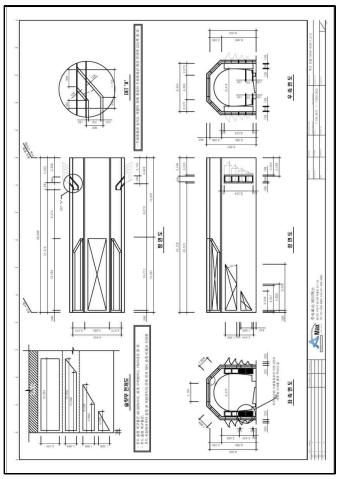
- 개발된 후드 구조체는 오송 철도종합시험선로에 설치한 시작품과 같이 슬릿과 수평통풍관이 적용된 타입을 기본 모델로 제시하고 있음.
- 후드 구조체가 설치되는 터널 입구 주변은 열악한 지형 조건, 철도 시스템과의 간섭 등 현장 환경에 따라 기본 모델 적용이 어려운 경우가 발생할 수 있으며, 다양한 현장 상황별 적용 가능한 모델이 필요함.
- 주관연구기관에서는 후드 구조체의 길이, 슬릿 등 구성 요소의 다양한 조합에 대한 축소 모형 실험을 진행하여 목표 수준의 미기압파 저감 성능을 가진 후드 모델의 제원을 도출하였음.
- 본 연구에서는 축소 모형 실험 결과 도출된 데이터를 기반으로 각 후드 모델별 실제 터널에 적용 가능한 1:1 풀-스케일의 표준 설계도면을 작성함.
- 총 27종의 후드 모델이 표 2.2.2h와 같이 개발되었으며, 터널 크기별 적용 가능한 모델이 구분되어 있음.

<표 2.2.2h 터널 단면 크기별 표준 후드 모델 분류(27종)>

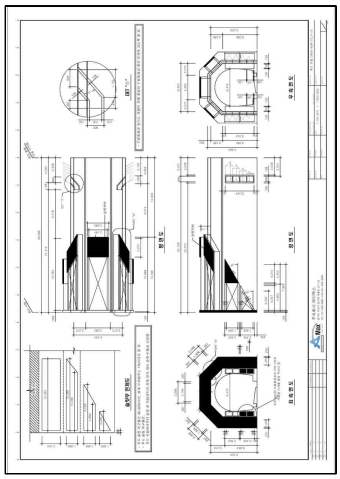
구분	터널 내공단면적	터널-후드 내공단면적 비	표준 후드 모델		
단선 터널	40㎡	1.557배	K3A17_2-2 	K3A17S_4-10 	K3A17S_7 
			K3A21_2 	K3A25_2 	K3LH103 
단선 터널	50㎡	1.555배	철도종합시험선로 후드 	K1A201 	K1A205 
			K1A107 	K1CH107-1 	K1CH107-3 
단선 터널	57㎡	1.553배	K5A107_4 	K5A107S_5-2 	K5A107S_4-10 
			K5A107S_7 	K5A201 	K5A205 
			K5A109 	K5A109_10 	K5LH103 
복선 터널	64㎡	1.555배	64㎡복선 B1형 	64㎡복선 A1형 	64㎡복선 A2형 
복선 터널	92㎡	1.555배	92㎡복선 B1형 	92㎡복선 A1형 	92㎡복선 A2형 

(나) 터널 단면 크기별 표준 후드 설계 도면

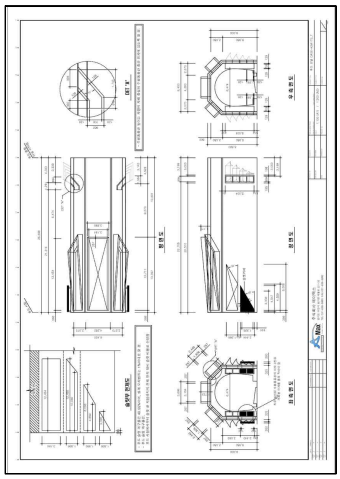
○ 내공단면적 40㎡급 단선터널 적용 후드 모델 6종



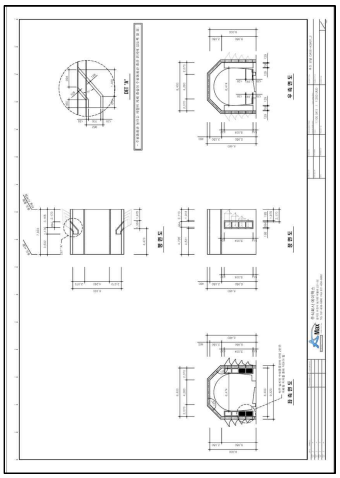
(a) K3A17_2-2



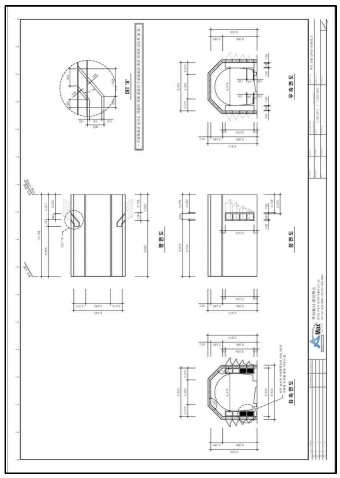
(b) K3A17S_4-10



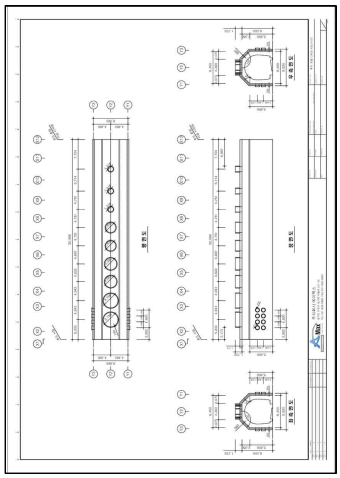
(c) K3A17S_7



(d) K3A21_2

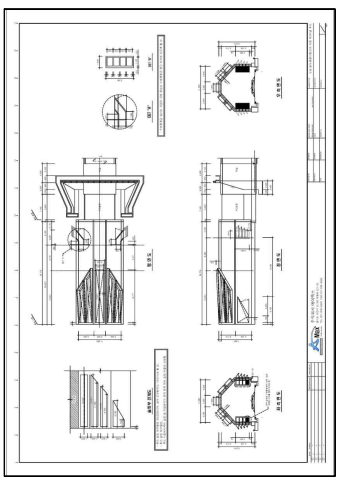


(e) K3A25_2

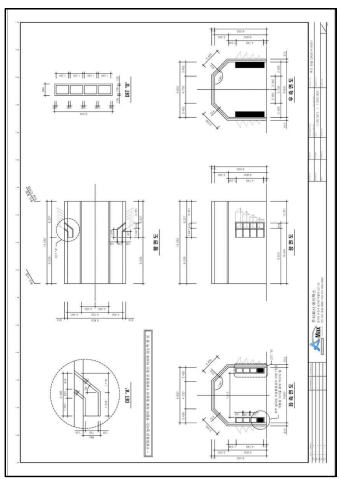


(f) K3LH103

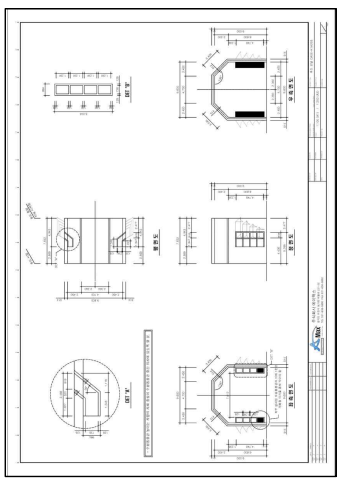
○ 내공단면적 50㎡급 단선터널 적용 후드 모델 6종



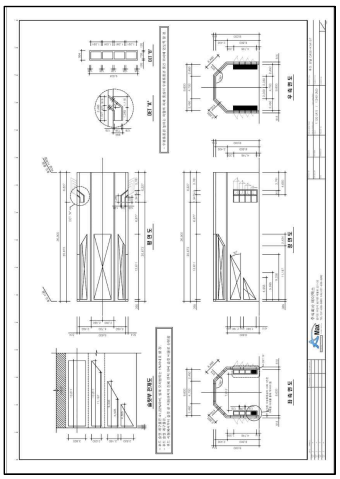
(a) 철도종합시험선로 후드(시작품)



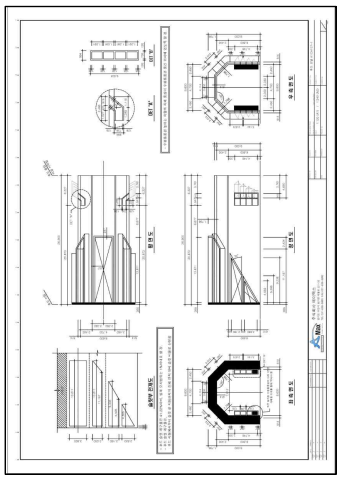
(b) K1A201



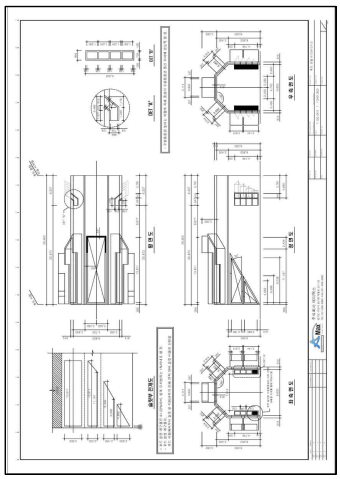
(c) K1A205



(d) K1A107

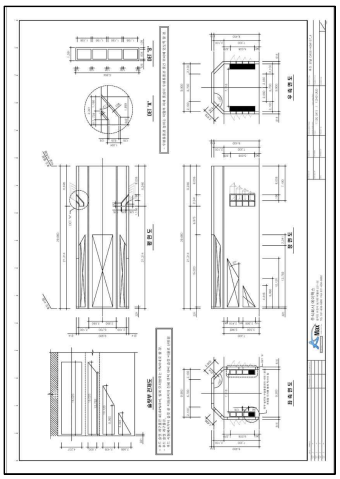


(e) KICH107-1

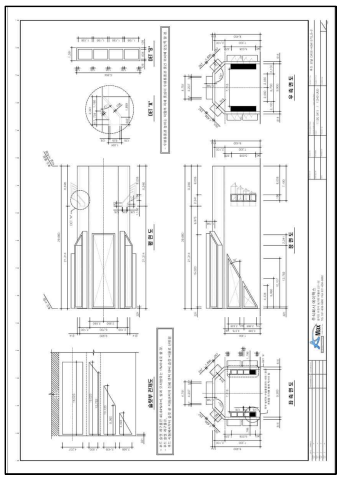


(f) KICH107-3

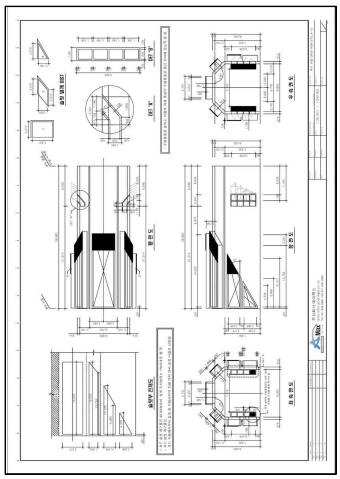
○ 내공단면적 57㎡급 단선터널 적용 후드 모델 9종



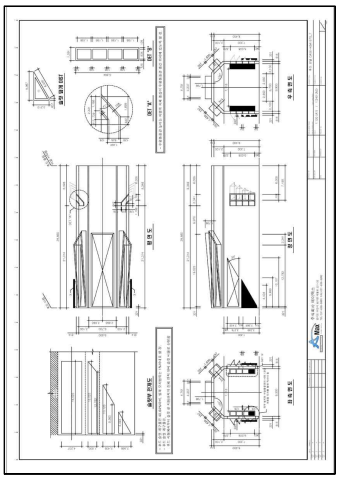
(a) K5A107_4



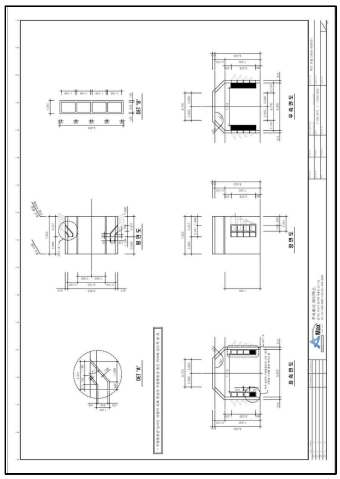
(b) K5A107S_5-2



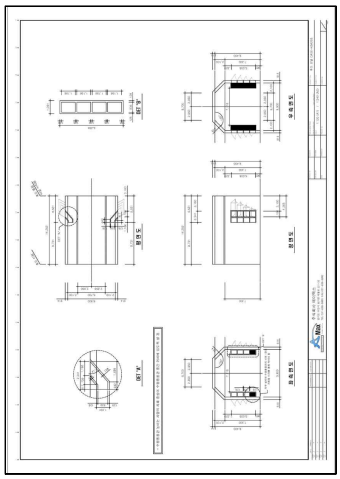
(c) K5A107S_4-10



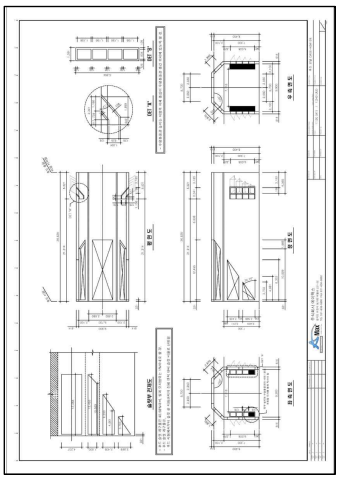
(d) K5A107S_7



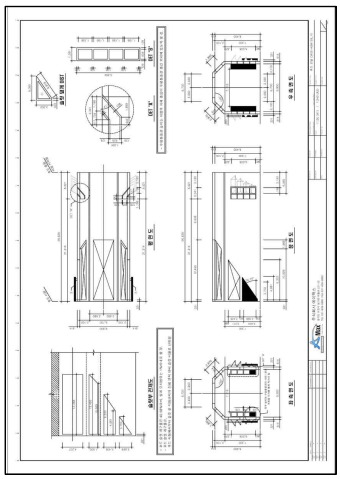
(e) K5A201



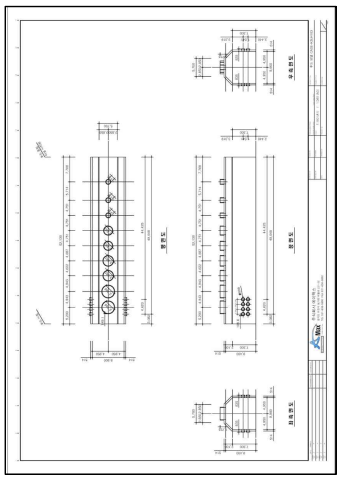
(f) K5A205



(g) K5A109

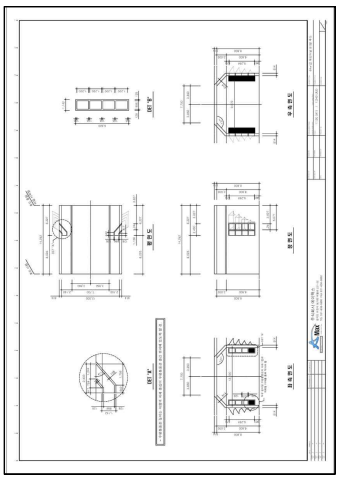


(h) K5A109_10

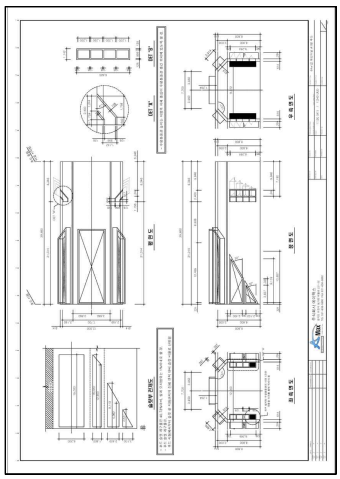


(i) K5LH103

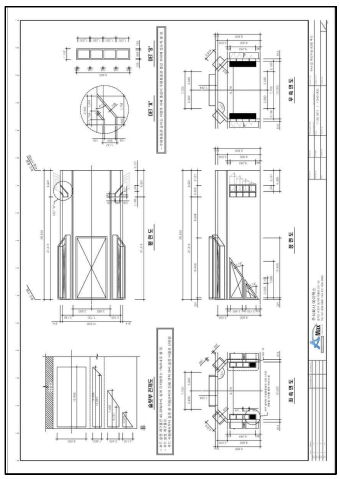
○ 내공단면적 64㎡급 복선터널 적용 후드 모델 3종



(a) 64㎡급 복선터널 후드 B1형

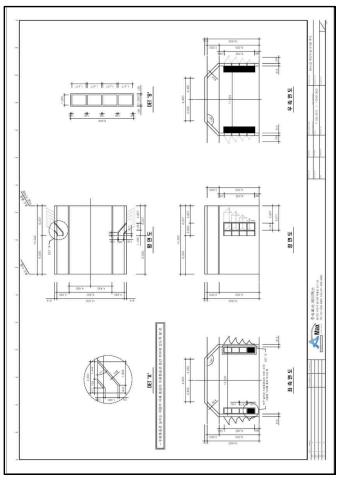


(b) 64㎡급 복선터널 후드 A1형

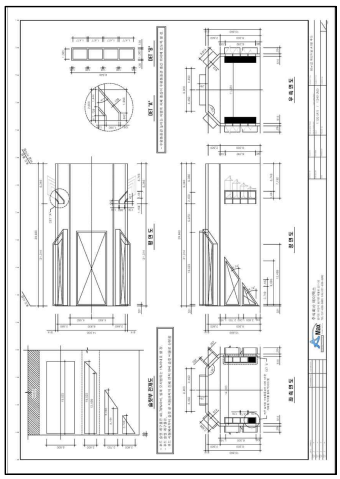


(c) 64㎡급 복선터널 후드 A2형

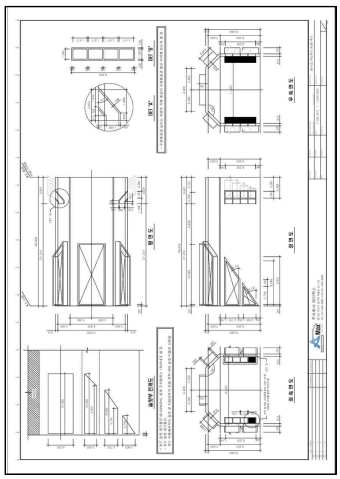
○ 내공단면적 92㎡급 복선터널 적용 후드 모델 3종



(a) 92㎡급 복선터널 후드 B1형



(b) 92㎡급 복선터널 후드 A1형

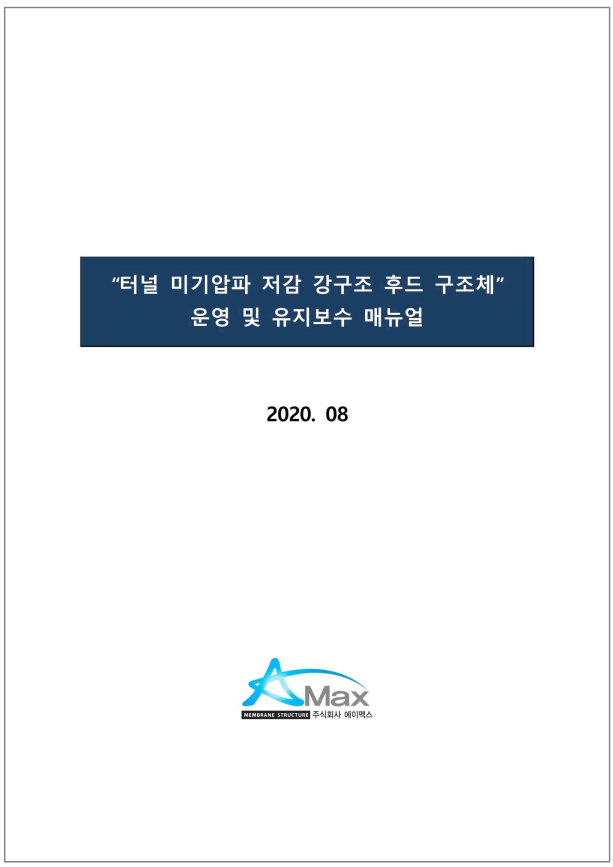


(c) 92㎡급 복선터널 후드 A2형

자. 후드 구조체 운영 및 유지보수 매뉴얼 최종안 작성

(1) 운영 및 유지보수 매뉴얼의 목적

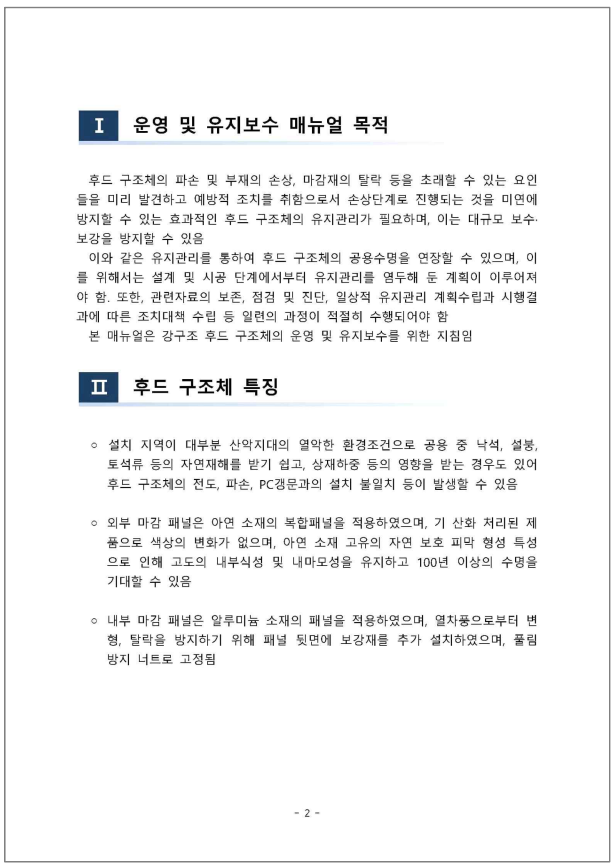
- 터널 미기압파 저감 강구조 후드 구조체의 파손 및 부재의 손상, 마감재의 탈락 등을 초래할 수 있는 요인들을 미리 발견하고 예방적 조치를 취함으로서 손상단계로 진행되는 것을 미연에 방지할 수 있는 유지관리가 필요하며, 효과적인 유지관리는 후드 구조체의 공용수명을 연장할 수 있음.
- 본 매뉴얼은 후드 구조체의 운영 관리자를 위한 기본적인 지침 제공의 목적으로 개발되었으며, 후드 구조체의 주요 점검 부위별 특징 및 유지관리 항목을 제시함.
- 개발된 후드 구조체 제작 매뉴얼은 다음과 같으며, 3차년도 정성적 성과점검보고서(B-4-2)에도 상세하게 수록되어 있음.



"터널 미기압파 저감 강구조 후드 구조체"
운영 및 유지보수 매뉴얼

2020. 08

MEMBRANE STRUCTURE 주식회사 에이맥스



Ⅰ 운영 및 유지보수 매뉴얼 목적

후드 구조체의 파손 및 부재의 손상, 마감재의 탈락 등을 초래할 수 있는 요인들을 미리 발견하고 예방적 조치를 취함으로서 손상단계로 진행되는 것을 미연에 방지할 수 있는 효과적인 후드 구조체의 유지관리가 필요하며, 이는 대규모 보수·보강을 방지할 수 있음

이와 같은 유지관리를 통하여 후드 구조체의 공용수명을 연장할 수 있으며, 이를 위해서는 설계 및 시공 단계에서부터 유지관리를 염두해 둔 계획이 이루어져야 함. 또한, 관련자료의 보존, 점검 및 진단, 일상적 유지관리 계획수립과 시행결과에 따른 조치대책 수립 등 일련의 과정이 적절히 수행되어야 함

본 매뉴얼은 강구조 후드 구조체의 운영 및 유지보수를 위한 지침임

Ⅱ 후드 구조체 특징

◦ 설치 지역이 대부분 산악지대의 열악한 환경조건으로 공용 중 낙석, 설붕, 토석류 등의 자연재해를 받기 쉽고, 상재하중 등의 영향을 받는 경우도 있어 후드 구조체의 전도, 파손, PC갱문과의 설치 불일치 등이 발생할 수 있음

◦ 외부 마감 패널은 아연 소재의 복합패널을 적용하였으며, 기 산화 처리된 제품으로 색상의 변화가 없으며, 아연 소재 고유의 자연 보호 피막 형성 특성으로 인해 고도의 내부식성 및 내마모성을 유지하고 100년 이상의 수명을 기대할 수 있음

◦ 내부 마감 패널은 알루미늄 소재의 패널을 적용하였으며, 열차풍으로부터 변형, 탈락을 방지하기 위해 패널 뒷면에 보강재를 추가 설치하였으며, 풀림 방지 너트로 고정됨

- 2 -

Ⅲ 후드 구조체 주요 점검 부위별 특징

1) 후드 구조체 상부 및 슬릿



후드 구조체 상부 및 슬릿

- 후드 구조체 설치 장소는 산악지역 등 지형적으로 열악한 조건을 가지고 있어서 낙석 등의 영향을 받아 상부의 파손 위험이 있음.
- 후드 슬릿은 미기압파 배출을 위한 개구부로, 팬스 등 슬릿 주변 패널 파손, 이물질 유입 등 점검 필요.
- 패널과 패널 사이에 기밀이 유지되어야 공기역학적 성능 유지함. 누수 여부로 점검 필요함.

※ 상부에서 작업 시 작업자의 하중으로 인한 패널 파손 위험 없음

2) 외부 벽체



외부 벽체

- 패널과 패널 사이에 기밀이 유지되어야 공기역학적 성능 유지함. 누수 여부로 점검 필요함.
- 후드 구조체의 외벽은 징크복합패널로 마감되어 있으며, 탈락, 변형, 파손, 줄눈 실리콘 이탈 여부 등을 점검할 필요가 있음

※ 줄눈 실리콘 이탈 시 해당 부위의 볼트 풀림, 파손 유무 점검 필요

3) 내부 벽체



내부 벽체

- 후드 구조체의 내벽은 알루미늄패널로 마감되어 있으며, 탈락, 변형, 파손, 줄눈 실리콘 이탈 여부 등을 점검할 필요가 있음

※ 줄눈 실리콘 이탈 시 해당 부위의 볼트 풀림, 파손 유무 점검 필요

- 내부 패널의 파손, 탈락 등의 경우 열차 운행에 지장 또는 큰 사고로 이어질 수 있어 세밀한 점검 필요

4) 후드 구조체 및 PC갱문(또는 터널 면벽) 접합부



후드 구조체와 터널 구조물 접합부

- 후드 구조체 종점부는 PC갱문 시점부 또는 터널 면벽과 접합이 되며, 미기압파 저감 성능 구현을 위해 항상 기밀이 유지되어야 함
- 내·외부 접합부 마감의 탈락, 경계부의 단차 발생 등 변상 발생에 유의해야 함

5) 수평통풍관



수평통풍관

- 수평 통풍관은 미기압파를 외부로 배출하는 주요 구조물로서 설치 위치로부터의 이탈, 외형 파손에 대한 점검 필요
- 수평 통풍관 Door의 작동 여부, 파손, 탈락, 잠금장치 등의 점검 필요

6) 처마



처마

- 수평통풍관의 외부 배출구 앞에 설치되는 구조물로서, 눈, 빗물 등 이물질이 통풍관 내부로 유입되는 것을 막아줌
- 외부에 노출되어 있어 낙석 등의 외부 영향으로 파손될 위험이 있음

7) 안전시설물 (안전통로 및 안전손잡이)



안전통로 및 안전손잡이

- 배수구 및 전기선, 통신케이블 등을 매립한 트라프의 덮개를 안전통로로 활용하는 경우 덮개의 파손, 이탈 등을 점검 필요
- 안전손잡이는 위급 상황 시 터널에서부터 사람이 사용하는 안전시설물로 파손 여부를 점검 필요

Ⅳ 후드 구조체 유지관리 점검 항목

시설물의 점검 및 진단자료는 다음의 점검 사항을 포함함

점검부위	점 검 항 목
주요 점검 항목	. 좌굴 조사 . 누수 조사 . 손상 조사 . 이물질 유입 조사 . 경사도 조사 . 접합부 볼트의 이완 및 탈락 . 기밀성 조사 ※ 후드 구조체의 전체 외부는 내부와의 기밀이 유지되어야 후드의 공기역학적 성능이 발휘 되므로 기밀성 조사는 중요함(수평 통풍관의 내부통로등도 기밀유지 중요함)
점검 요령	1. 점검방법 - 후드의 양측부나 상부에서 관찰하되 근접 육안검사가 필요한 경우는 후드 외벽에 설치된 사다리 또는 고소차 등을 이용하여 실시함 - 후드 상부는 육안검사를 통해 낙석 등 이물질을 제거함 - 후드의 외관 상태를 파악한 후 마감 패널의 탈락, 파손, 기밀 여부 등을 기록함 - 슬릿은 육안검사로 이물질 유입 등 확인함 - PC갱문(또는 터널 면벽)과의 경계부 단차 등 변상에 대해 점검함 - 측량장비를 이용하여 후드의 경사, 침하, 이동 등에 대한 조사를 실시함 - 후드 내부 상태를 파악한 후 마감 패널의 탈락, 파손 등을 기록함 - 안전통로는 육안검사를 통해 파손 부위를 확인함 - 수평통풍관은 육안검사를 통해 내부 이물질 및 파손 상태를 확인함 - 수평통풍관의 Door(개폐장치)는 직접 동작 여부를 확인함 - 처마는 육안검사를 통해 파손 여부를 확인함 - 볼트의 조임은 육안검사를 통해 이완 및 탈락여부를 확인함 - 실리콘 부착 부분은 육안검사를 통해 시공불량 및 파손을 확인함 2. 변상 발생 시 조치사항 - 좌굴 및 단차, 누수 등 각 변상에 대한 외관망도 작성 후 변상 사진촬영 - 변상의 진행성이 관측되면 즉시 전문가에 의한 현장자문 의뢰 3. 점검 시 유의사항 - 운행 열차에 대한 안전조치(운행 정지 등)를 취한 후 조사를 실시하되 2인 1조로 점검을 시행함 - 접근장비를 이용한 상세조사가 필요한 경우 교통소통 및 안전에 유의 - 자료 본존의 연속성을 위해 점검일지는 관리책임자를 지정하여 관리함
점검도구	필기도구, 외관망도, 줄자, 균열자, 점검망치, 손전등, 카메라, 야광조끼, 견광봉

2.3 국내 고속열차 차량 특성과 철도터널 주변 환경에 대한 미기압파 민감도 연구

가. 터널 출구갱문 형상에 따른 미기압파의 3차원 방사패턴 분석/평가

(1) 국내 철도터널의 지형환경 특성 조사/분석

○ 국내 철도 터널 주변의 지형 특성 현지 조사 및 데이터 베이스화

- 터널 출구로부터 방사하는 미기압파의 수치해석을 위해서는 터널 출구 주변 지형조건 데이터가 필요함. 오송 시험선의 터널 주변 지형은 국내 철도터널에 적용된 전형적인 지형조건(한쪽, 양쪽사면 지형 및 교량 지형 등)을 고려하여 설계되었음.

○ 국내 철도 입/출구 갱문 특성 조사 및 데이터 베이스화

- 국내 철도에 적용된 전형적인 터널 입/출구 갱문 형상은 고속열차를 도입하면서 수직 갱문 형상에서 경사 갱문 형상으로 다르게 설계됨. 이는 열차 속도가 증가함에 따라 터널 출구 갱문에서 방사하는 미기압파를 저감하기 위함임.

○ 국내 철도 선로 특성 조사 및 데이터 베이스화

- 종래 연구에 따르면 콘크리트 슬라브를 적용한 선로보다 밸라스트를 적용한 터널 선로에서 미기압파의 최대값이 감소하였음. 이는 터널 내부를 전파하는 압축파가 다공성 재질과 같은 표면을 가지는 밸라스트 보다 매끄러운 표면을 가지는 슬라브 적용 선로를 통과하면서 파면의 압력구배가 급격하게 증가하기 때문임. 따라서 슬라브 적용 선로인 경우 입구후드와 같은 추가적인 미기압파 저감대책이 시급함.

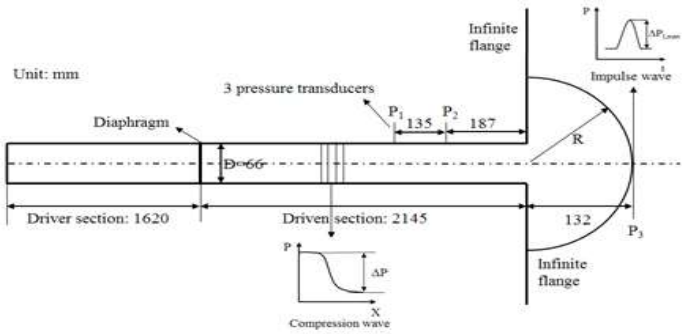
(2) TEST-BED 노선의 터널 출구갱문 형상에 따른 미기압파 방사패턴 분석연구

(가) 수치해석 방법 및 검증

○ 계산영역 및 경계조건

- 그림 2.3.1a에는 터널을 모사하기 위하여 실험에 사용된 충격파관에 대한 장치도임[Kim et al., 2001]. 터널 출구면에 무한 플랜지가 설치된 것을 모사하기 위하여 충격파관 출구단에 무한 플랜지를 적용하였으며, 고압부와 저압부는 격막으로 구분하였음. 고압부와 저압부의 압력차이로 인해 격막이 파막되며, 충격파가 발생함. 이 충격파는, 열차가 터널 입구에 돌입 시 발생하는 압축파로 간주할 수 있으며, 출구 방향으로 전파하여 출구면에서 방사함. 수치해석에 적용된 계산영역은 수치해석 기법의 검증을 위해 그림 2.3.4a와 동일하게 모델링하였음. 경계조건으로는 실험의 격막 위치에 사용자 정의 기능(user defined function)을 사용하여 충격파에 해당하는 파형을 Inlet pressure 조건으로 사용하였으며, 터널 및 무한 플랜지에는 벽면조건을, 터널 출구 외부에는 Outlet pressure 조건을 적용함.

- 실험에서는 압력 측정을 위하여 터널 내/외부에 3개의 압력 센서(P1, P2, P3)가 설치되어 있으며, 수치해석에서는, 추가적으로 터널출구 중심에서 터널 중심선 상에 4개의 측정점(R=D(반경), 5D, 7.5D, 10D)을 추가하여, 터널 출구에서 발생하는 미기압파를 측정하였음. 또한 수치해석에서는 R=2D의 위치에서 방위각에 따른 미기압파를 측정하기 위하여, 5개의 측정점(θ=0°, 30°, 45°, 60°, 90°)을 추가적으로 설치하였음.



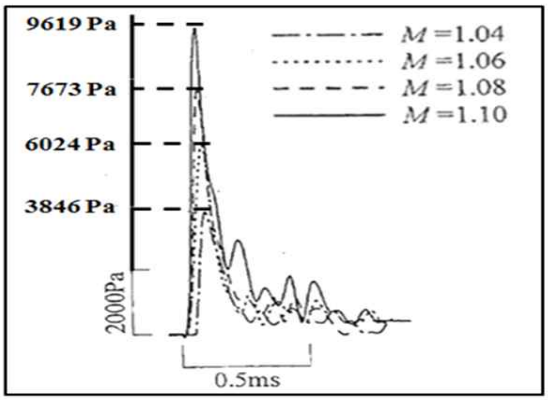
<그림 2.3.1a 수치해석 검증을 위한 실험장치 개략도>

○ 수치해석 기법

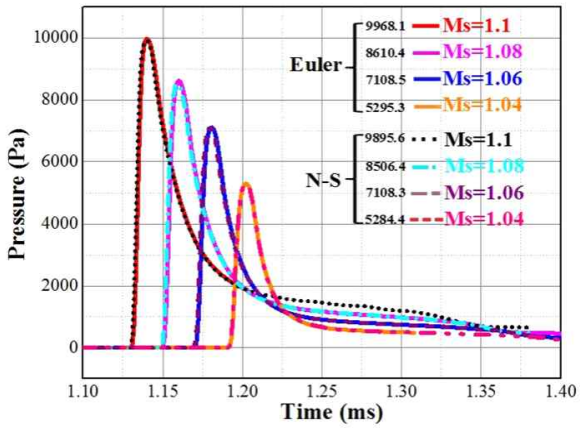
- ANSYS Fluent 17.0 소프트웨어를 사용하여 작동 유체는 ideal gas를 적용. Euler, Navier-Stokes Equation을 사용하였으며, 터널 벽면은 경계층 격자를 적용. AUSM scheme, Second-order implicit scheme 그리고 Second-order upwind scheme을 사용함.

○ 수치해석 검증

- 그림 2.3.1a의 실험 모델을 사용한 실험결과와 수치해석 결과를 비교 검증하기 위하여, 터널 출구에서 방사하는 미기압파를 측정하였음. 경계조건은 전술한 바와 같으며, 저압부는 대기압을 적용하였으며, 고압부는 1.201 atm, 1.313 atm, 1.433 atm, 1.562 atm을 적용하여 충격파 마하수(Ms) 1.04, 1.06, 1.08, 1.1을 발생시킴.
- 그림 2.3.2a의 (a)와 (b)에는 방위각 θ=0° 이며 터널 중심으로부터의 거리 R=2D인 위치에서 실험과 수치해석에서 측정한 미기압파 압력을 나타냄. Euler 및 Navier-Stokes 방정식의 경우 값이 거의 유사하게 나타났으며, 수치해석에서 측정한 미기압파의 최대값은 실험값 보다 조금 더 크게 나타남. 이는 수치해석이 2차원 해석이기 때문임. 또한 실험의 경우 수치해석과는 달리 압력 파형의 변동이 나타남.
- 그림 2.3.3a은 실험과 수치해석에서 터널 출구면으로부터 방사하는 미기압파의 밀도 분포이며, 수치해석에서 미기압파의 가시화 결과 형상을 매우 유사하게 재현함.
- 그림 2.3.4a에서 플랜지가 없는 터널 형상을 사용하여, 충격파 마하수(Ms) 1.15에서 Euler, Navier-Stokes 방정식, 실험 결과를 비교 검증함. **수치해석의 미기압파의 최대값이 실험값 보다 대략 5% 정도 높게 나타남. 이상의 결과로부터 수치해석은 실제 실험에서 발생하는 미기압파를 적절히 예측하였음.**

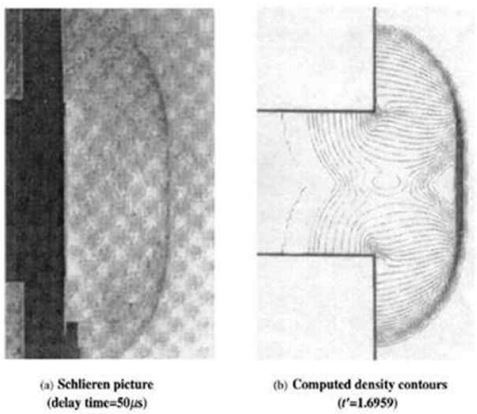


(a) 실험 압력파형

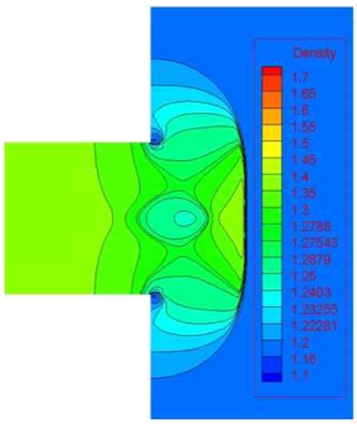


(b) 수치해석 압력파형

<그림 2.3.2a 무한 플랜지를 가지는 터널로부터 방사하는 미기압파의 압력파형 비교(L=2D)>

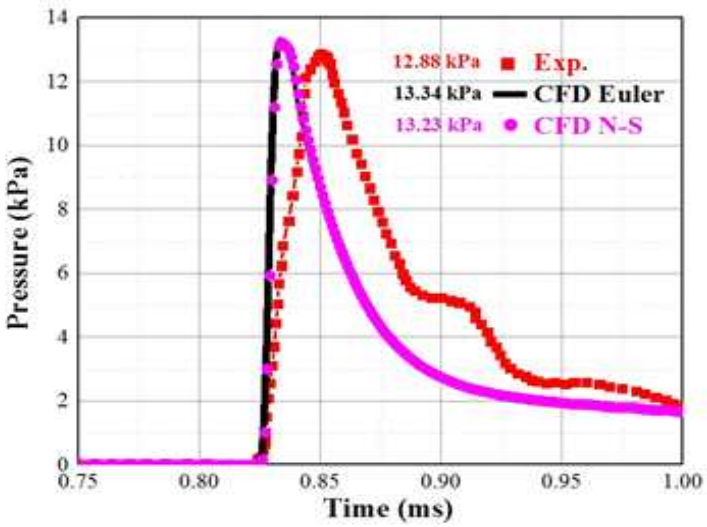


(a) 밀도분포(실험 및 기존 해석)



(b) 밀도분포(현 수치해석)

<그림 2.3.3a 수치해석 검증을 위한 밀도분포 비교>



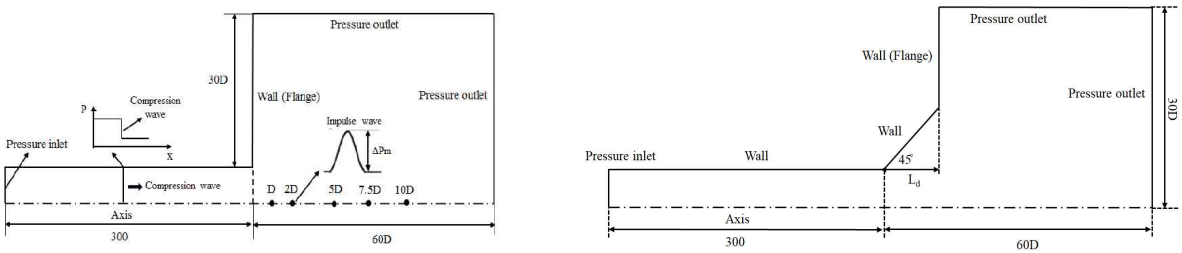
<그림 2.3.4a 수치해석 검증을 위한 터널 미기압파의 압력파형 비교>

(나) 수치해석 결과 및 고찰

○ 수치해석용 터널모델

- 실제 터널을 그대로 모델링하여 수치해석하기 위해서는 장시간이 소요됨. 본 연구는 터널 출구에 도달한 압축파가 터널 출구 갱문 형상에 따른 미기압파의 방사 특성에 어떤 영향을 미치는지를 조사하는 것임. 따라서 터널 출구 부근만 모델링하여 해석시간을 줄였음.

- 그림 2.3.5a에는 본 연구에 사용된 터널 갱문 형상들이며, 실제 수치해석에서는 해석 시간을 더 줄이기 위하여, 2차원 축대칭 터널 형상을 사용함. 터널 직경은 66mm이고, 터널 길이는 300mm를 사용하였음. 터널 입구를 Pressure inlet으로 적용하여, 압축파를 발생시켰으며, 터널과 터널 출구의 플랜지는 벽면조건, 터널 출구 외부는 Pressure outlet을 적용하였음. 터널 출구 갱문 형상을 고려하기 위하여, 플랜지 유무에 따른 터널 형상 및 출구 갱문의 각도를 고려한 형상에 대하여 수치해석을 수행함. 또한 소단면 단선 경우 미기압파의 전파 특성을 고려하기 위하여, 압축파의 압력구배를 증가시켜 수치해석을 수행하였음.

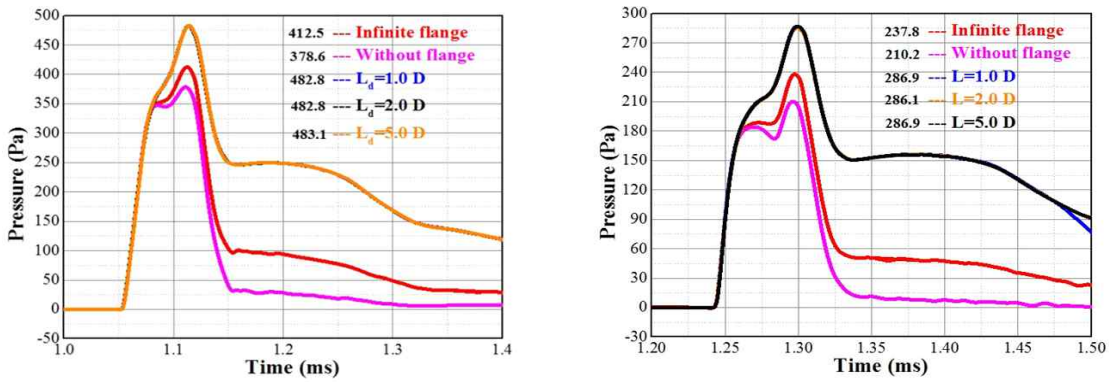


(a) 터널출구 수직갱문형상 (b) 터널출구 각을 가지는 갱문형상

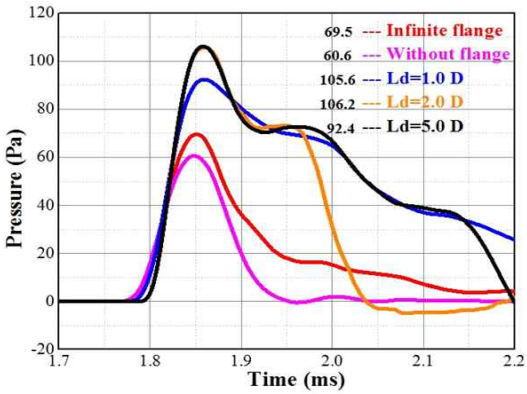
<그림 2.3.5a 수치해석용 터널갱문형상 모델을 위한 계산영역>

○ **터널 출구 갱문 형상에 따른 미기압파 방사 특성**

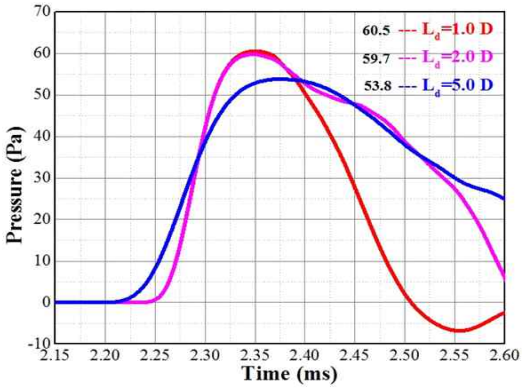
- 그림 2.3.6a에서는 다양한 터널 출구 갱문 형상에 대하여 주어진 위치에서 미기압파의 압력을 나타내었음. 그림에서 터널 출구 갱문 각도가 45° 일 때 플랜지의 길이를 변화(LD=1.0D, 2.0D, 5.0D)시킨 경우, 90° 의 각도를 가지는 무한 플랜지 및 플랜지가 없는 경우에 대한 수치해석을 수행하였음.



(a) L=D (b) L=2D



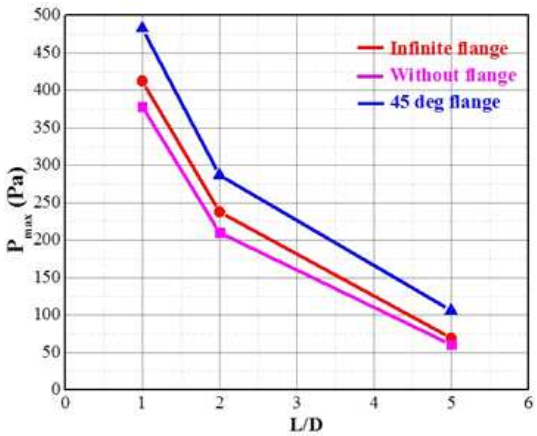
(c) L=5D



(d) L=7.5D

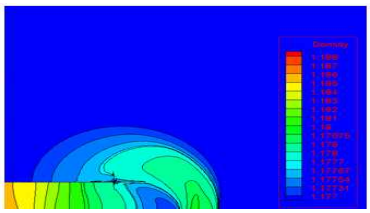
<그림 2.3.6a 터널갱문형상에 따른 특정 위치에서 미기압파의 압력파형>

- 터널 출구로부터의 거리(L=D, 2D, 5D, 7.5D)에 따른 미기압파의 압력분포를 측정하였으며, pressure inlet의 압력은 1.01 atm임. **미기압파의 최대값은 90° 의 각도를 가지는 무한 플랜지 및 플랜지가 없는 터널 출구 갱문 형상에 비하여, 플랜지의 각도가 45° 인 터널 출구 갱문 형상에서 크게 나타남.** 또한 플랜지의 각도가 45° 일 때 플랜지 길이를 변화시킨 경우, 터널출구로부터 인접한 거리(L=D, 2D)에서는 미기압파의 최대값, 압력 구배 및 압력 분포는 거의 유사하게 나타남. 하지만 터널 출구로부터 멀어질수록, 압력 구배 및 분포에 차이가 발생함. 그러나 45° 플랜지 형상의 터널 출구 갱문이 90° 의 각도를 가지는 무한 플랜지 및 플랜지가 없는 터널 출구 갱문 형상에 비하여, 미기압파의 최대값은 크지만, 미기압파가 길어짐.

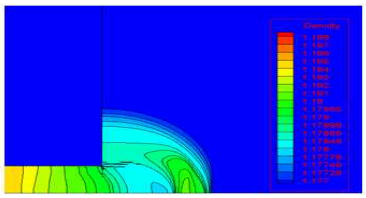


<그림 2.3.7a 터널갱문형상과 특정 위치에 따른 미기압파의 최대값>

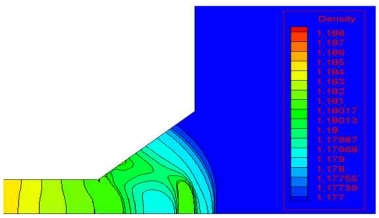
- 그림 2.3.7a는 플랜지가 없는 경우, 무한 플랜지 및 45° 플랜지에 대하여 터널 출구로부터의 거리에 따른 미기압파의 최대값을 나타냄. **그림에서 미기압파의 최대값은 45° 의 플랜지에서 가장 크게 나타났으며, 형상에 상관없이 터널 출구와 인접한 위치에서는 급격하게 감소하였으나, 거리가 멀어질수록 점진적으로 감소함.**



(a) 플랜지가 없는 경우



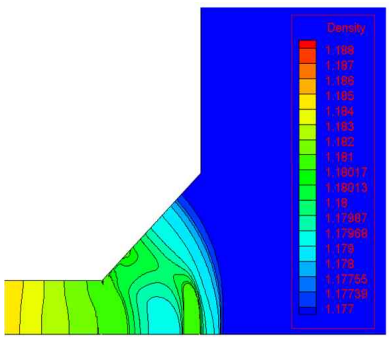
(b) 90° 플랜지인 경우



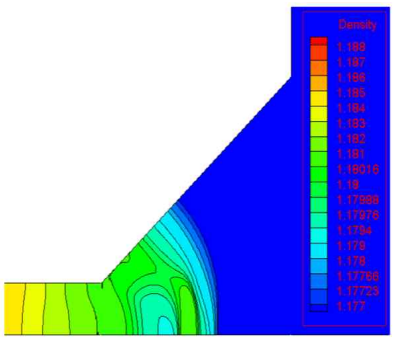
(c) 45° 플랜지인 경우

<그림 2.3.8a 시간 t=1.1ms에서 밀도분포>

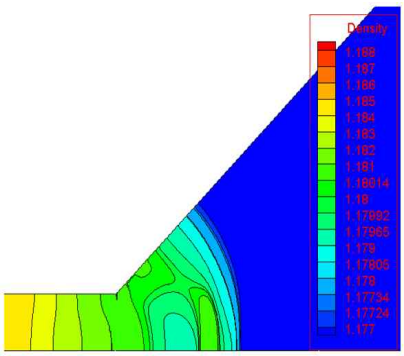
- 그림 2.3.8a는 그림 2.3.7a에 해당하는 미기압파의 형상에 대한 밀도 분포를 나타냄. 시간 t=1.1 ms일 때 터널 출구 갱문 각도에 따른 미기압파의 방사 형상을 예측할 수 있음.



(a) LD=D



(b) LD=2D



(c) LD=3D

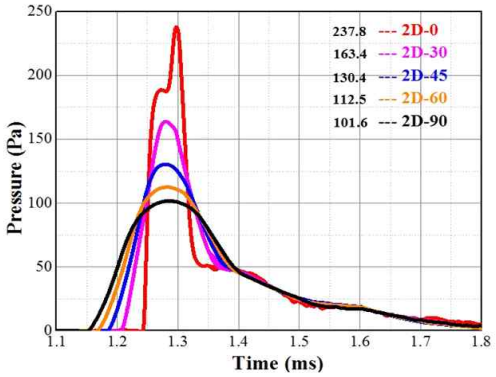
<그림 2.3.9a 시간 t=1.1ms에서 플랜지 길이에 따른 밀도분포>

- 그림 2.3.9a에서 시간 t=1.1 ms일 때, 플랜지 길이를 변화시켜 밀도분포를 측정한 결과, 터널 출구와 인접한 지역에서 미기압파를 측정하였기 때문에, 미기압파 형상의 큰 변화는 확인되지 않음.

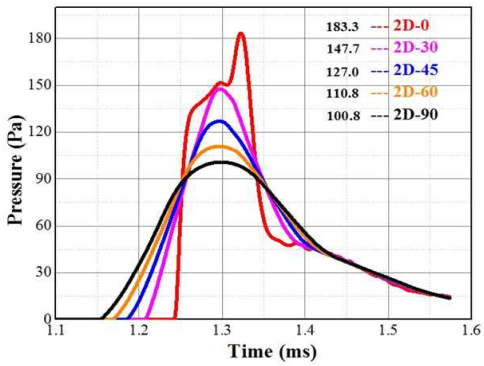
(3) 소단면 단선터널 출구갱문 형상에 따른 미기압파 방사패턴 분석연구

○ 소단면 단선 터널 출구갱문에서 미기압파 전파 특성

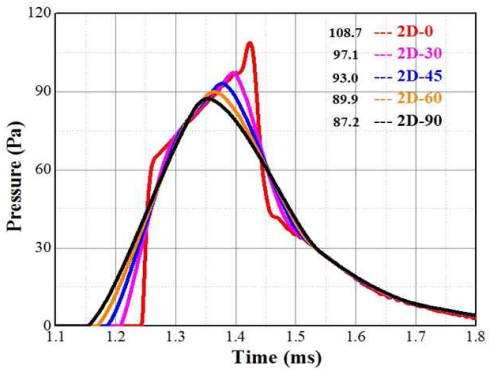
- 터널 갱문 각도가 90° 일 때, 소단면 단선을 구현하기 위하여 압축파의 압력구배를 증가시키면서 특정 위치 R=2D에서 서로 다른 방위각에 대하여 측정한 미기압파의 압력 분포를 그림 2.3.10a에 나타냄. 동일한 방위각에서 압축파의 압력구배가 증가할수록 미기압파의 최대값이 증가하였음. 압축파의 동일한 압력구배에서 방위각이 증가할수록 미기압파의 최대값은 점진적으로 감소함. 이 결과로부터 소단면 단선 터널 출구 갱문이 터널 단면이 큰 경우에 비하여 방사 미기압파의 지향성이 강하게 나타남을 알 수 있음.



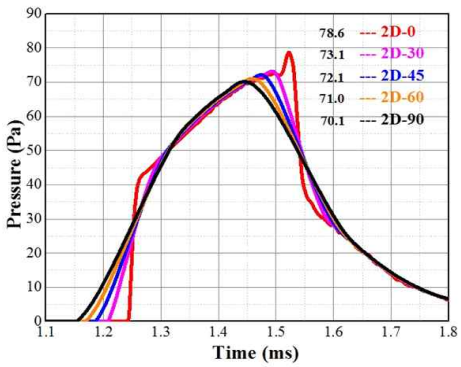
(a) Δt=0.000075s



(b) Δt=0.0001s

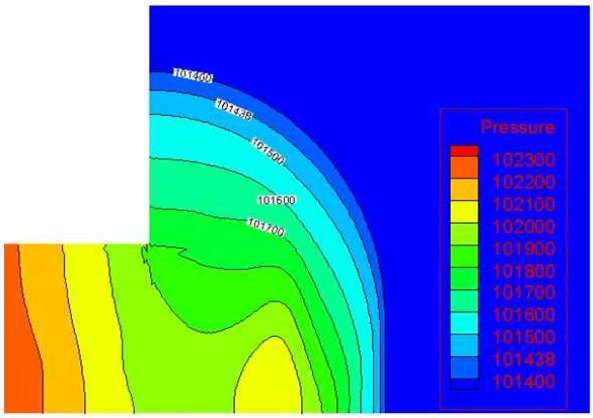


(c) Δt=0.0002s

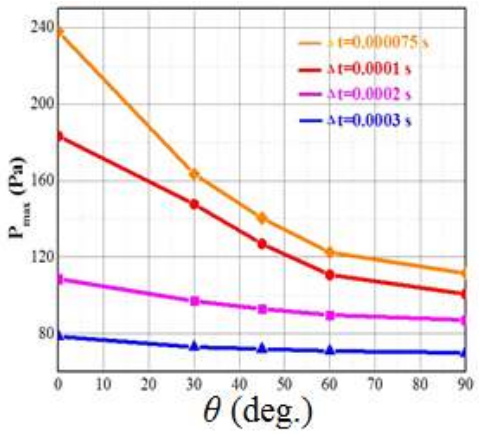


(d) Δt=0.0003s

<그림 2.3.10a 시간 t=1.1ms에서 플랜지 길이에 따른 밀도분포>



(a) 시간 t=1.0ms에서 압력분포



(b) 미기압파의 최대값

<그림 2.3.11a 특정 시간에서의 압력분포와 특정 반경 R=2D에서 각도에 따른 미기압파의 최대값 비교>

- 그림 2.3.11a (a)에서는 90° 의 무한 플랜지를 가진 터널 갱문 형상인 경우, 터널 출구에서 압축파가 미기압파로 방사할 때의 압력분포를 나타냄. 미기압파가 각각의 각도에 도달하는 시간은 0° 에서 90° 로 갈수록 시간은 감소함. 이는 미기압파의 방사 형태는 반구형 형태가 아닌 반타원 형태로 방사된다는 것을 의미함. 또한 그림 2.3.11a(b)에는 압축파의 압력구배에 대하여 특정 거리에서 방위각과 미기압파 최대값의 관계를 나타냄. **압축파의 압력구배가 증가할수록, 방위각 증가에 따른 미기압파 최대값은 급격하게 감소함. 압축파의 압력구배가 증가할수록 미기압파의 지향성이 강하게 나타나는 것을 알 수 있음.**

(4) 결론

○ 수치해석의 미기압파의 최대값이 실험값 보다 대략 5% 정도 높게 나타남. 수치해석은 실제 실험에서 발생하는 미기압파를 적절히 예측 가능함.

○ 미기압파의 최대값은 90° 의 각도를 가지는 무한 플랜지 및 플랜지가 없는 터널 출구 갱문 형상에 비하여, 플랜지의 각도가 45° 인 터널 출구 갱문 형상에서 크게 나타남.

○ 미기압파의 최대값은 터널 갱문형상이 45° 의 플랜지에서 가장 크게 나타났으며, 형상에 상관없이 터널 출구와 인접한 위치에서는 급격하게 감소하였으나, 거리가 멀어질수록 점진적으로 감소함.

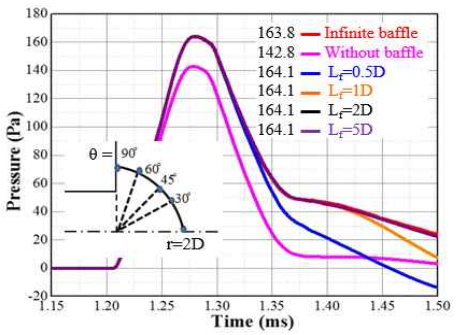
○ 소단면 단선 터널갱문에서 압축파의 압력구배가 증가할수록, 방위각 증가에 따른 미기압파 최대값은 급격하게 감소함. 압축파의 압력구배가 증가할수록 미기압파의 지향성이 강하게 나타나는 것을 알 수 있음.

나. 국내 터널 상세사양에 따른 미기압파의 주파수특성 분석/평가

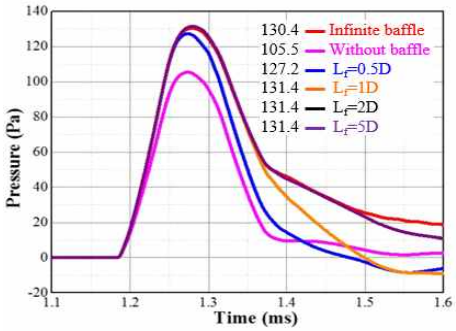
(1) 슬라브 궤도 터널로부터 방사되는 미기압파 특성 연구

○ 배플 플레이트 길이 영향

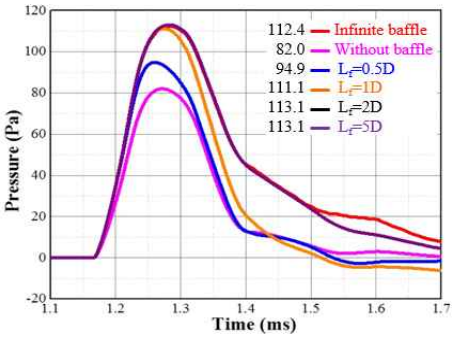
- 개발된 수치해석 기법들을 활용하여 슬라브 궤도 터널로부터 방사되는 미기압파의 특성에 관하여 수치해석적으로 조사함.



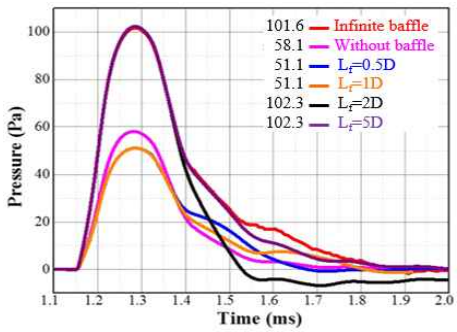
(a) r=2D, θ =30°



(b) r=2D, θ =45°



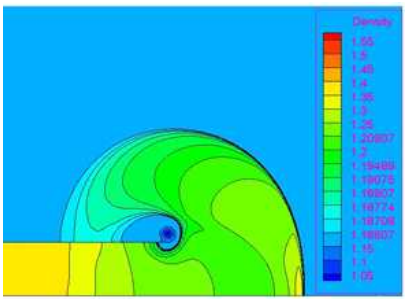
(c) r=2D, θ =60°



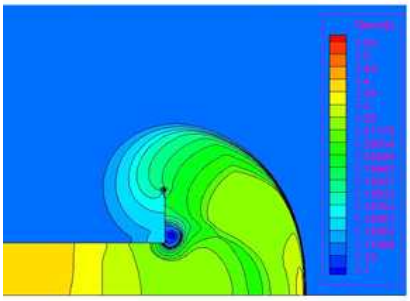
(d) r=2D, θ =90°

<그림 2.3.1b 배플 길이에 따른 방위각 θ 에서 미기압파의 압력파형(r=2D)>

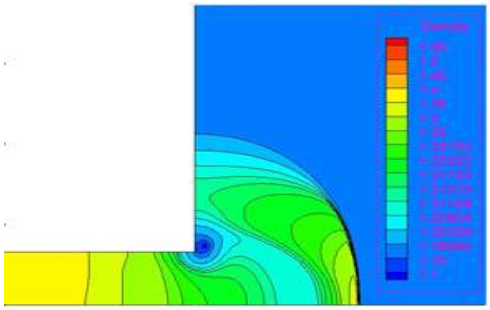
- 그림 2.3.1b에는 미기압파의 방사특성을 알아보기 위하여 과잉압력이 1.01atm이고 압력상승 시간 0.000075s인 터널 내부를 전파하는 압축파로 가정하는 경우, 배플 플레이트 길이 변화에 따른 터널 출구로부터 일정한 반경 r=2D의 반시계 방향으로 방위각 θ =30° ~ 90° 위치에서 시간변화에 따른 미기압파의 압력파 파형을 구하였음. 그림 2.3.25(a)로부터 터널 출구 중심으로부터 r=2D와 θ =30° 인 위치에서 **터널 출구에 배플 플레이트를 설치하게 되면 미기압파의 최대값이 증가**하는 것을 알 수 있음. 그림에서 터널 출구면의 배플 플레이트 길이가 증가하더라도 미기압파의 최대값은 일정한 값을 가짐. 또한 그림에서 미기압의 폭은 배플 플레이트를 설치함으로써 증가하는 것을 알 수 있음. 그림 2.3.12(b)~(d)에서와 같이 **방위각 θ 가 증가할수록 배플 플레이트 길이가 짧은 경우(Lf=1D 이하)가 긴 경우에 비하여 미기압파의 최대값이 감소하였으며, 특히 θ =90° 에서는 배플 플레이트를 장착하지 않은 경우보다 미기압파의 최대값이 감소하였음.** 전체적으로 보면 터널 출구로부터 특정 반경의 거리에서 방위각에 따라 미기압파의 최대값이 감소하는 것으로부터 음의 지향성(directivity)이 존재하는 것을 알 수 있음.



(a) Without baffle plate



(b) Lf=0.5D



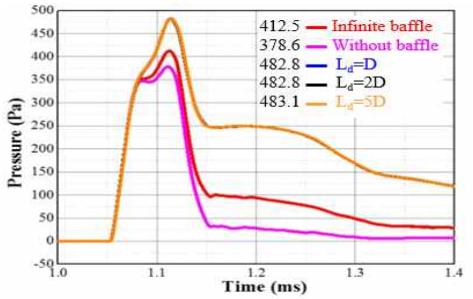
(c) Infinite baffle plate

<그림 2.3.2b 배플 플레이트 길이에 따른 터널 방사 미기압파의 밀도분포>

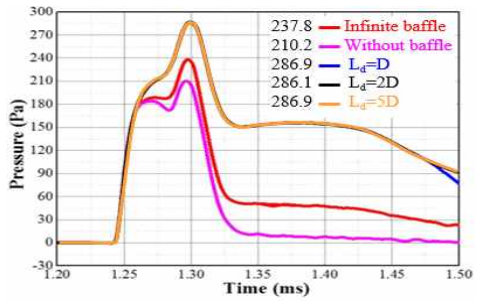
- 터널 출구에 설치되는 배플 플레이트 길이에 따른 미기압파의 영향을 알아보기 위하여 동일한 유동 시간 1.0ms에 대하여 등밀도분포를 그림 2.3.2b에 나타내었음. 그림에서 배플 플레이트 유무와 길이 변화에 따라 터널 출구로부터 방사하는 미기압파의 방사 패턴이 영향을 받는 것을 알 수 있음. **미기압파는 배플 플레이트가 없는 경우에는 원형에 가까운 형태로 방사되는 반면에 배플 플레이트의 길이가 증가할수록 타원형 형태로 바뀌는 것을 알 수 있음.**

○ 배플 플레이트 각도 영향

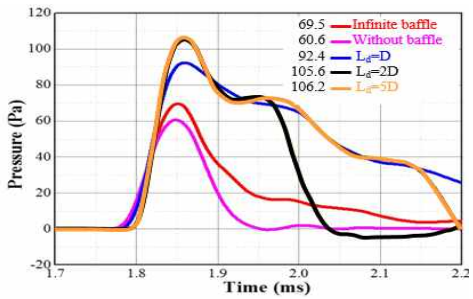
- 그림 2.3.3b에는 미기압파에 대한 배플 플레이트 각도의 영향을 조사하기 위하여, 터널 출구 중심으로부터 떨어진 특정 거리에서 시간변화에 따른 미기압파의 압력 파형을 계산하였음. 그림에서 터널 출구에서 배플 플레이트의 각도가 45° 를 유지하면서 Ld의 길이가 변화는 경우가 배플 플레이트가 없는 경우와 배플 플레이트의 각도가 90인 무한 배플 플레이트의 경우에 비하여 r값에 상관없이 미기압파의 최대값은 높게 나타났으나, 미기압파의 폭이 넓게 나타나는 것을 알 수 있음. 종래 연구에 따르면 터널 출구에서 미기압파의 최대값이 충격음을 발생하는 값 이상으로 나타나더라도, 미기압파의 폭이 넓은 경우에는 충격음이 발생하지 않다고 보고하였음[Hieke et al., 2009]. 또한 그림으로부터 근거리(r=2D 이하)에서는 미기압파의 압력 파형 및 최대값은 45° 의 각도를 가지는 배플 플레이트의 Ld값에 영향을 받지 않았음. 전체적으로 배플 플레이트 각도에 상관없이 미기압파의 최대값은 터널 출구로부터 멀어질수록 급격히 감소하였음.



(a) r=D

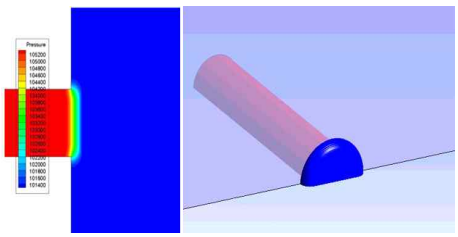


(b) r=2D

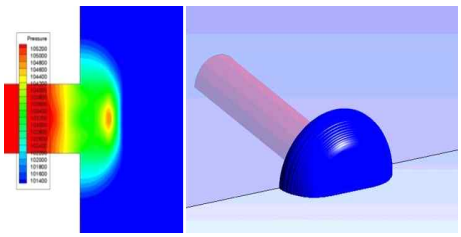


(c) r=5D

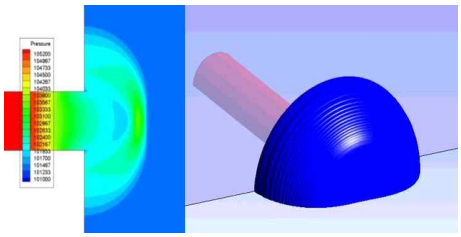
<그림 2.3.3b 특정 반경에서 배플 플레이트 각도에 따른 미기압파의 압력파형>



(a) Time t = 0.9ms



(b) Time t = 1.0ms



(c) Time t = 1.1ms

<그림 2.3.4b 배플 플레이트를 가진 터널출구에서 미기압파의 발생과 전파>

○ 배플 플레이트 터널로부터 미기압파 방사 특성

- 그림 2.3.4b에는 90° 인 무한 배플 플레이트가 설치된 터널 출구로부터 미기압파가 방사하는 과정을 시간변화에 따른 등압력분포를 이용하여 3차원적으로 가시화하였음. 그림으로부터 **미기압파의 방사 특성은 초기에는 플랫한 형태로 방사하여 타원형 형태를 거쳐 구형으로 변화되는 것을 알 수 있음. 이는 지향성을 가지는 미기압파가 공간을 전파하며 소산되어 음파로 바뀌는 것을 의미함.**

(2) 결론

○ 터널 출구에 배플 플레이트를 설치하게 되면 미기압파의 최대값이 증가하였음.

○ 터널 출구면의 배플 플레이트 길이가 증가하더라도 특정 위치에서 미기압파의 최대값은 일정한 값을 가지며, 미기압의 폭은 배플 플레이트를 설치함으로써 증가하였음.

○ 방위각이 증가할수록 배플 플레이트 길이가 짧은 경우가 긴 경우에 비하여 미기압파의 최대값이 감소하였으며, 특히 방위각 90° 에서는 배플 플레이트를 장착하지 않은 경우보다 미기압파의 최대값이 감소하였음.

○ 배플 플레이트 유무와 길이 변화에 따라 터널 출구로부터 방사하는 미기압파의 방사 패턴이 영향을 받았음.

○ 미기압파는 배플 플레이트가 없는 경우에는 원형에 가까운 형태로 방사되는 반면에 배플 플레이트의 길이가 증가할수록 타원형 형태로 바뀌는 것을 알 수 있음.

○ 터널출구로부터 근거리에서 미기압파의 압력 파형 및 최대값은 45° 의 각도를 가지는 배플 플레이트의 길이에 영향을 받지 않았으며, 배플 플레이트 각도에 상관없이 미기압파의 최대값은 터널 출구로부터 멀어질수록 급격히 감소하였음.

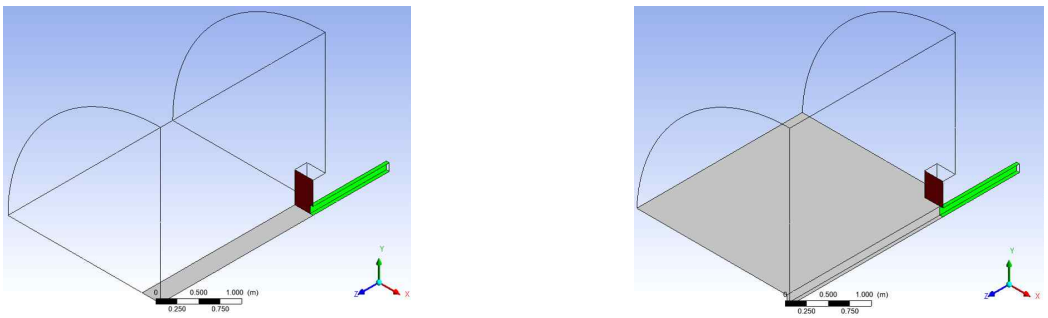
○ 미기압파의 방사 특성은 초기에는 플랫한 형태로 방사하여 타원형 형태를 거쳐 구형으로 변화되는 것을 알 수 있음. 이는 지향성을 가지는 미기압파가 공간을 전파하며 소산되어 음파로 바뀌는 것을 의미함.

다. 미기압파가 주변의 민가/기타 구조물에 미치는 영향 분석/평가

(1) 미기압파와 주변 구조물의 간섭현상에 대한 연구

○ 개요

- 그림 2.3.1c와 같은 2가지 형태의 터널출구 지형조건을 모사하여 터널출구로부터 방사하는 미기압파의 강도 및 방사특성에 대하여 수치해석을 수행하였음. 또한 열차 진입속도는 250km/h 이하급의 상용고속철도에 관한 것으로, 열차속도를 180, 200, 250, 275 km/h로 제한하였으며, 터널출구로부터 떨어진 특정 위치들에서 터널출구 지형조건이 터널 방사 미기압파의 전파특성에 미치는 영향을 조사하였음.

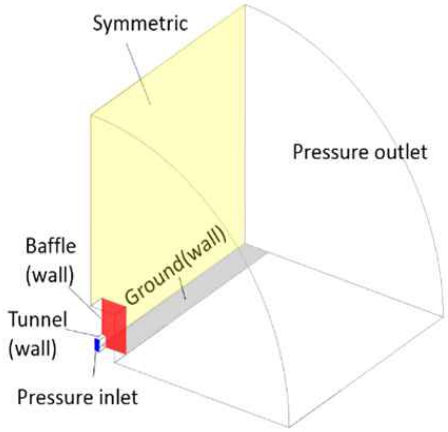


(a) Plain condition (b) U-shape condition

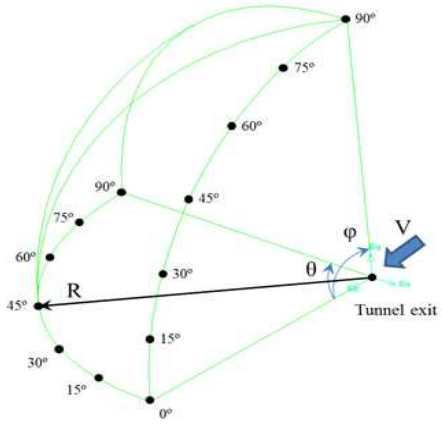
<그림 2.3.1c 터널출구 주변의 2가지 형태의 지형조건>

○ 수치해석 방법

- 고속열차의 진입속도가 터널 출구에서 방사하는 미기압파에 미치는 영향을 조사하기 위하여 3차원 수치해석을 수행하였음. 그림 2.3.2c에는 수치해석에 사용된 계산영역과 경계조건을 나타내었음. 그림에서 계산영역은 한국철도기술연구원에서 보유하고 있는 고속열차-터널 모델 주행 시험장치의 출구부분과 동일하게 모사하였음. 또한 그림에서 계산의 편의성을 위하여 열차 진행방향에 대하여 대칭 조건을 사용하였으며, 터널, 배플판과 지면은 벽면조건, 입구조건으로 Pressure inlet, 출구조건으로 Pressure outlet을 사용하였음. 특히, 입구조건에서는 열차 진입속도에 따라 한국철도기술연구원의 모델실험 장치로부터 얻은 터널내부의 압축파의 압력파형을 사용자 정의 함수(user defined function, UDF) 형태로 그대로 적용하였음.



<그림 2.3.2c 계산영역 및 경계조건>

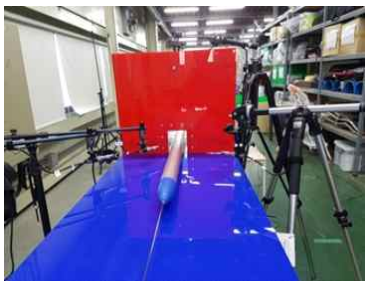


<그림 2.3.3c 미기압파 측정위치>

- 한편 미기압파에 영향을 미치는 터널 출구 주변 지형조건은 교량조건과 유사함. 본 수치해석에서는 그림 2.3.18와 같이 터널 출구로부터 방사하는 미기압파의 압력파형을 구하기 위하여, 터널 출구로부터 떨어진 거리 R을 터널의 등가직경 De로 나눈 값인 R/De=1, 3, 6의 위치를 정하였음. 또한 그림에서와 같이 미기압파의 3차원 방사 특성을 알아보기 위하여 방위각 θ, ϕ를 정의하였다. 본 연구에서는 터널 출구로부터 방사하는 미기압파의 3차원 방사패턴을 조사하기 위하여 표 2.3.1c에서 같은 방위각을 선정하였음.

<표 2.3.1c 본 연구에 사용된 방위각>

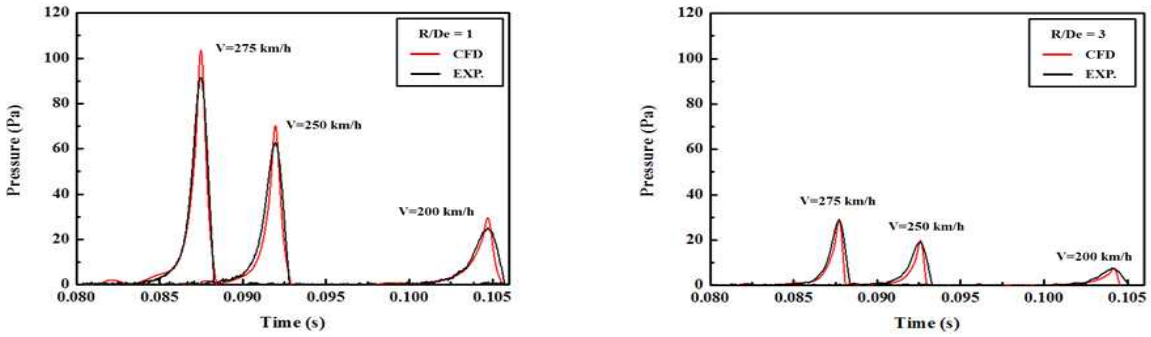
No.	θ (deg.)	ϕ (deg.)
1	0	0 ~ 90 (+15)
2	45	0 ~ 90 (+15)
3	90	0 ~ 90 (+15)
4	0 ~ 90 (+15)	0



<그림 2.3.4c 수치해석 검증을 위한 실험장치>

- 수치해석 검증에 이용된 한국철도기술연구원의 고속열차-터널 모델 주행 실험장치에 대한 사진을 그림 2.3.4c에 나타내었음. 실험에서는 방위각이 각각 θ=45°, ϕ=0°이며, R/De=1, 3의 위치에서 미기압파의 압력파형을 측정하였음. 본 수치해석에서는 고속열차 진입속도에 대하여 실험과 동일한 위치에서 미기압파의 압력파형을 비교 검증하였음.

○ 수치해석 검증



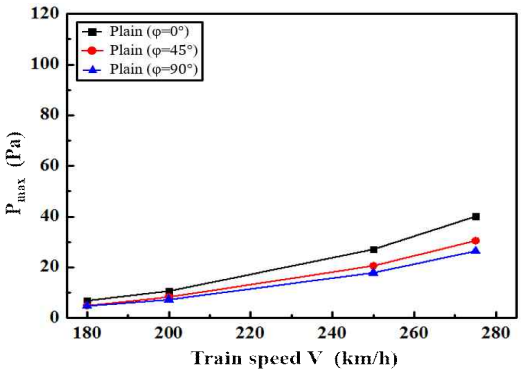
(a) 터널출구로부터 근거리 영역 (b) 터널출구로부터 원거리 영역

<그림 2.3.5c 열차속도에 대한 미기압파의 압력파형의 실험과 수치해석 결과 비교>

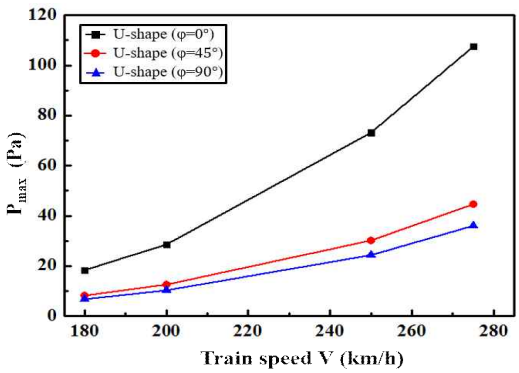
- 수치해석 기법을 검증하기 위하여, 그림 2.3.5c에는 실험과 동일한 조건에 대하여, 고속열차 진입속도가 200, 250, 275km/h로 변화하는 경우, 방위각 θ=45°, ϕ=0° 이며 터널 출구로부터의 거리 R/De= 1, 3의 위치에서, 시간의 변화에 따른 미기압파의 압력파형을 수치해석하여 실험과 비교 검증하였음. 그림으로부터 열차의 진입속도에 관계없이 터널 출구로부터 근거리 (R/De=1)인 경우, **미기압파의 최대값은 수치해석의 경우가 실험에 비하여 다소 크게 나타났지만, 시간에 대한 압력파형의 폭은 잘 예측하였음.** 또한 원거리(R/De=3)의 경우에서는 수치해석 결과가 실험을 잘 예측하였음. 따라서 **수치해석으로 미기압파의 압력파형을 예측하는 경우, 터널 출구로부터 근거리보다는 원거리에서 하는 것이 타당함.**

○ 터널출구 주변조건에 따른 미기압파 특성

- 터널출구 주변조건이 주어지는 경우, 고속열차 진입속도에 따라 미기압파의 방사특성에 어떠한 영향을 미치는지를 조사하였음. 그림 2.3.6c에는 터널출구 주변 조건이 평지인 경우와 U자 형상의 단면을 가지는 조건인 경우, R/De=3이고 방위각 θ=0° 이며 다른 방위각 ϕ=0°, 45°, 90° 인 위치에서 열차 진입속도에 따른 터널출구에서 방사하는 미기압파의 최대값을 나타내었음. 그림으로부터 **열차 진입속도에 대하여 방위각 ϕ에 상관없이 터널출구 주변 조건이 U자 형상인 경우가 평지조건에 비하여 미기압파의 최대값이 크게 나타났음.** 또한 미기압파의 최대값은 열차 진입속도가 증가할수록 증가하지만, 방위각 ϕ가 증가할수록 터널출구 주변 조건에 상관없이 감소하였음. 이는 **터널출구 주변 조건에 상관없이 열차진행 방향(θ=0°, ϕ=0°)에서 미기압파의 최대값이 가장 크게 나타나는 것을 알 수 있음.**

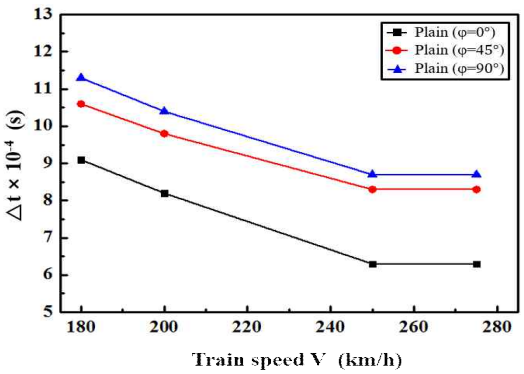


(a) Plain condition

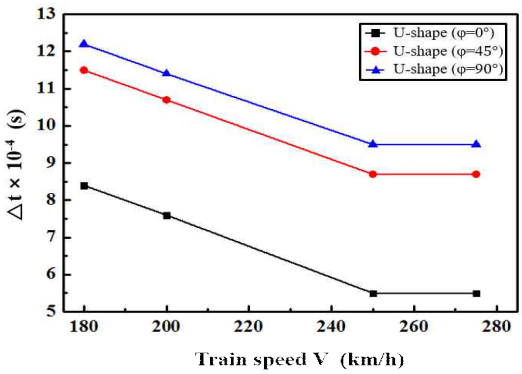


(b) U-shape condition

<그림 2.3.7c 터널출구 주변 지형에서 열차속도에 대한 미기압파의 최대값 (R/De=3, θ=0°)>



(a) Plain condition

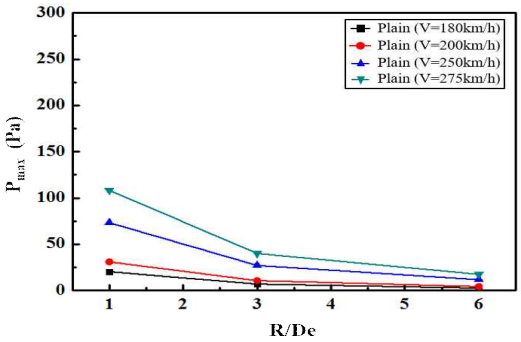


(b) U-shape condition

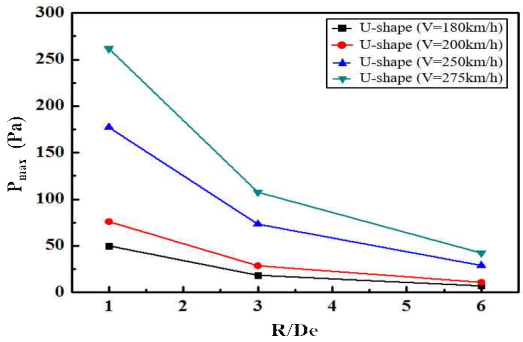
<그림 2.3.8c 터널출구 주변 지형에서 열차속도에 대한 미기압파의 시간폭 (R/De=3, θ=0°)>

- 그림 2.3.8c에서는 그림 2.3.7c와 동일한 위치에서 열차 진입속도와 터널출구 주변 조건에 따라 미기압파 압력파형의 시간폭을 조사하였음. 그림으로부터 터널 방사 미기압파의 시간폭은 터널출구 주변 조건에 상관없이 열차 진입속도가 250km/h까지는 거의 선형적으로 감소하며, 그 이상의 속도에서는 일정한 값을 가졌음. 또한 방위각 ϕ가 증가함에 따라 터널 미기압파의 시간폭은 증가하였음. 한편, 그림에서 **터널출구 조건이 U자 형상인 경우에서 터널 미기압파의 시간폭이 상대적으로 평지 조건에 비하여 짧게 나타났음. 따라서 지금까지의 결과로부터 터널출구 주변 조건이 평지인 경우보다 U자 형상인 경우에 충격성소음을 수반하는 터널 미기압파가 발생하기 쉬움.**

○ 터널출구로부터 거리에 따른 미기압파 특성

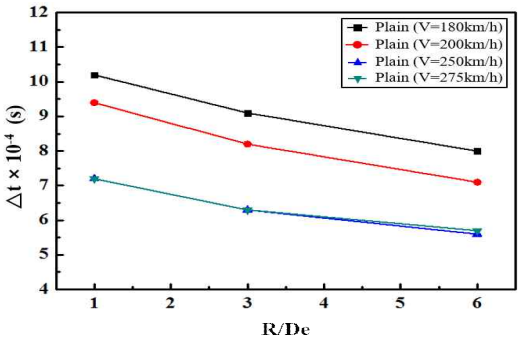


(a) Plain condition

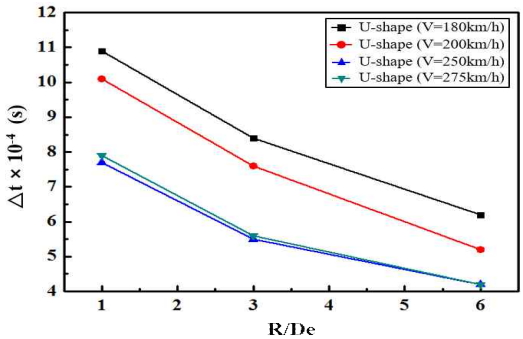


(b) U-shape condition

<그림 2.3.9c 터널출구로부터 거리에 따른 미기압파의 최대값 (θ=0°, ϕ=0°)>



(a) Plain condition

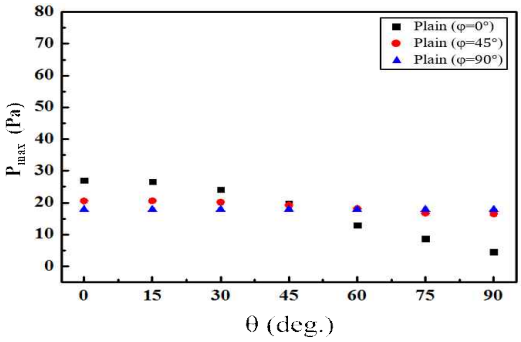


(b) U-shape condition

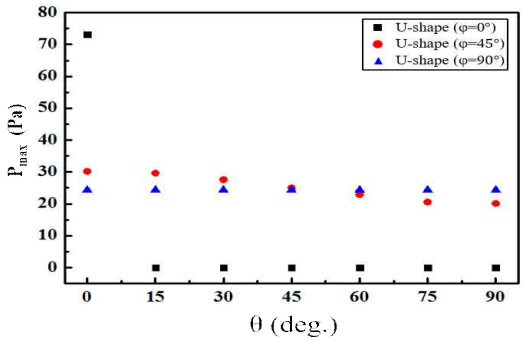
<그림 2.3.19c 터널출구 주변 지형에서 거리에 대한 미기압파의 시간폭 (θ=0°, ϕ=0°)>

- 열차 진입속도와 터널출구 주변 조건이 변하는 경우 터널출구로부터 떨어진 거리에 따라 터널 방사 미기압파가 어떤 특성을 가지는 알아보기 위하여, 방위각 θ=0°, ϕ=0°를 가지는 R/De=1, 3, 6 위치에서 미기압파의 최대값과 그 압력파형의 시간폭을 그림 2.3.9c와 2.3.10c에 나타내었음. 터널 미기압파의 최대값은 터널출구로부터 거리가 증가함에 따라 터널출구 주변 조건과 열차진입속도에 상관없이 감소하였음. **그러나 터널출구 주변 조건이 U자 형상의 경우가 평지보다 터널 미기압파의 최대값은 터널출구로부터 거리에 상관없이 크게 나타났음.** 주어진 위치(R/De=1, 3, 6 및 θ=0°, ϕ=0°)에서 미기압파 파형의 시간폭은 터널출구로부터 거리가 증가함에 따라 터널출구 주변 조건에 상관없이 감소하였음. 또한 시간폭은 U자 형상의 조건인 경우 평지의 조건에 비하여 터널출구로부터 근거리에서는 길게 나타났지만, 원거리로 갈수록 짧게 나타났음. 열차진입 속도가 250km/h 이상에서는 터널출구로부터 거리에 상관없이 모든 위치에서 미기압파 압력파형의 시간폭이 일정하게 나타났음. 이러한 결과들은 특히 **U자 형상의 조건을 가지는 터널출구 주변에 민가가 있는 경우, 미기압파의 최대값과 그의 시간폭에 대한 자료는 방음대책 마련에 기초자료로 활용될 수 있음.**

○ 방위각에 따른 미기압파 특성

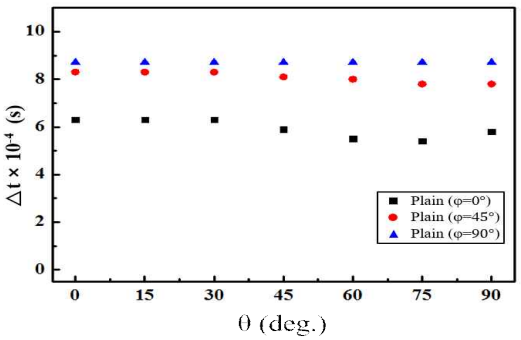


(a) Plain condition

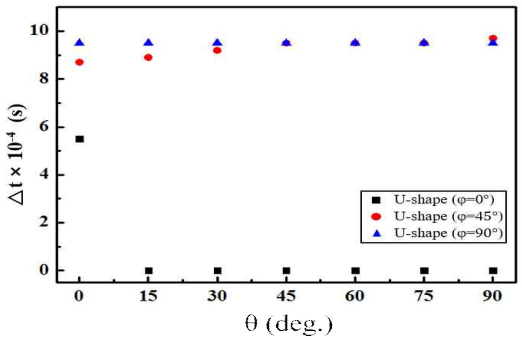


(b) U-shape condition

<그림 2.3.11c 터널출구로부터 방위각 θ에 따른 미기압파의 최대값 (V=250km/h, R/De=3)>



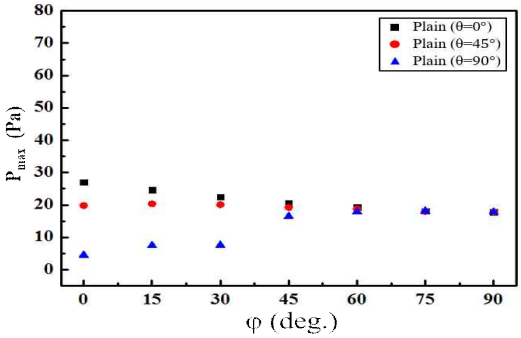
(a) Plain condition



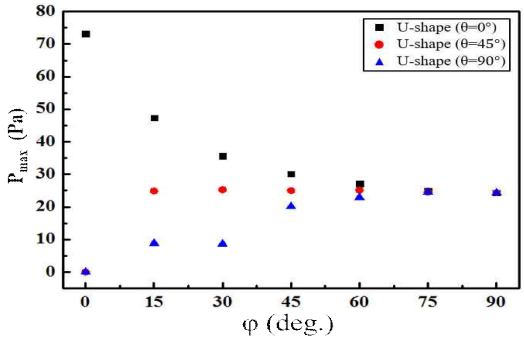
(b) U-shape condition

<그림 2.3.12c 터널출구 주변 지형에서 방위각 θ에 대한 미기압파의 시간폭 (V=250km/h, R/De=3)>

- 열차 진입속도가 250km/h 이고, 터널출구로부터의 거리 R/De=3의 위치에서 터널출구 주변 조건이 주어지는 경우 방위각에 따른 터널 미기압파의 3차원 방사특성을 알아보기 위하여 미기압파의 최대값과 그 압력파형의 시간폭을 그림 2.3.11c ~ 2.3.12c에 각각 나타내었음. 우선 방위각 ϕ가 일정한 값을 가지는 경우, 방위각 θ를 15° 간격으로 변화시키는 경우 터널 미기압파의 방사특성을 나타내었음. ϕ=0° 인 경우, 터널출구 주변이 평지인 경우는 θ가 증가함에 따라 터널 미기압파의 최대값은 완만하게 감소하였음. U자 형상의 조건에서는 θ가 15° 이상의 경우에 대하여는 지형조건으로 인하여 계산값을 얻을 수 없지만, θ=0° 인 경우의 평지 지형조건과 비교하여 보면 열차 진행 방향으로 매우 강한 미기압파가 방사됨을 알 수 있음. 그러나 ϕ=45° 와 90° 인 경우 미기압파의 최대값을 살펴보면, 방위각 θ의 변화에 대하여 일정한 값을 가지지만, U자 형상이 평지에 비하여 다소 크게 나타났음. 따라서 **평지 지형조건에 비하여 U자 형상의 지형조건에서 열차진행 방향으로 터널 미기압파의 지향성이 강하게 나타남을 알 수 있음.** 또한 미기압파의 시간폭은 방위각 θ의 변화에 대하여 지형조건에 상관없이 일정한 값을 가지며, 방위각 ϕ가 0° 에서 증가할수록 증가하다가 ϕ=45° 이상에 대해서는 일정한 값을 가졌음.

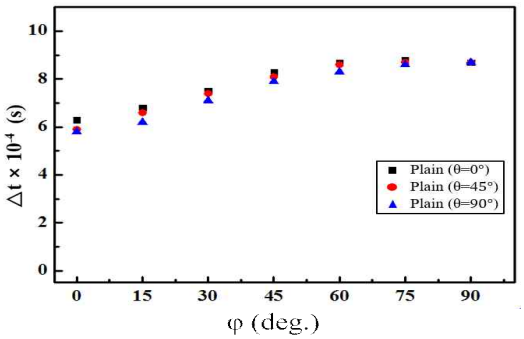


(a) Plain condition

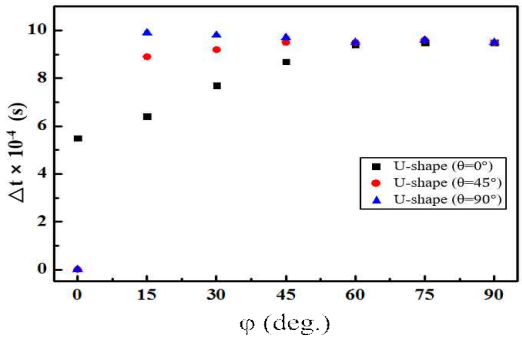


(b) U-shape condition

<그림 2.3.13c 터널출구로부터 방위각 ϕ에 따른 미기압파의 최대값 (V=250km/h, R/De=3)>



(a) Plain condition



(b) U-shape condition

<그림 2.3.14c 터널출구로부터 방위각 ϕ에 따른 미기압파의 시간폭 (V=250km/h, R/De=3)>

- 그림 2.3.13c와 2.3.14c에서는 열차진입속도가 250km/h이며 R/De=3인 위치에서 터널출구에서 방사하는 미기압파의 3차원 방사특성을 알아보기 위하여 방위각 θ가 일정한 값을 가지는 경우, 방위각 ϕ를 15° 간격으로 변화시키면서 미기압파의 최대값과 그 압력파형의 시간폭을 나타내었음. θ=0° 인 경우, 터널출구 주변 지형이 평지인 경우는 ϕ가 증가함에 따라 터널 미기압파의 최대값은 완만하게 감소하지만, U자 형상의 지형에서는 급격하게 감소하였음. 그러나 미기압파의 최대값은 θ=45° 에서는 터널출구 지형조건에 상관없이 일정한 값을 가졌음. θ=90° 에서는 ϕ가 증가함에 따라 미기압파의 최대값이 증가한 후 일정한 값을 가졌음. 그림 2.3.13c(b)로부터 ϕ=0° 이면서 θ=45° 와 90° 에서는 주변 조건의 영향으로 계산값을 구할 수가 없었음. 한편 미기압파의 시간폭은 터널출구 주변 조건이 평지인 경우 θ값에 상관없이 ϕ가 증가함에 따라 증가하지만, U자 형상의 지형조건인 경우 θ=0° 에서 ϕ가 증가함에 따라 시간폭도 증가하였으며, θ=45° 와 θ=90° 에서는 ϕ값에 상관없이 거의 일정한 값을 가졌음. **방위각 θ와 ϕ의 변화에 대한 결과로부터 터널출구에서 방사하는 미기압파는 음파와 같이 완전한 구형 형상으로 방사하는 것이 아니라 열차진행 방향으로 지향성을 가지면서 타원형 형태로 방사하는 것을 알 수 있음.**

○ 결론

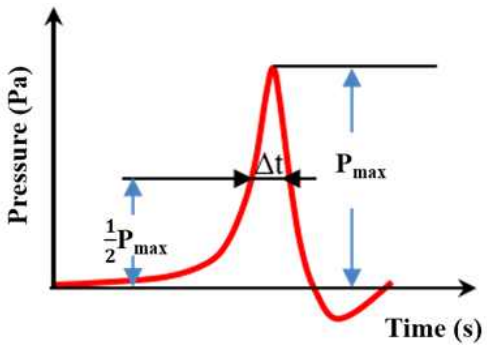
- 터널출구로부터 근거리에서는 미기압파의 최대값을 수치해석의 경우가 실험에 비하여 다소 크게 나타났지만, 시간에 대한 압력파형의 폭은 잘 예측하였음.
- 터널출구로부터 원거리의 경우에서는 수치해석 결과가 실험을 잘 예측하였음. 따라서 수치해석으로 미기압파의 압력파형을 예측하는 경우, 터널 출구로부터 근거리보다는 원거리에서 하는 것이 타당함.
- 열차 진입속도에 대하여 방위각에 상관없이 터널출구 주변 조건이 U자 형상인 경우가 평지조건에 비하여 미기압파의 최대값이 크게 나타났음.
- 미기압파의 최대값은 열차 진입속도가 증가할수록 증가하지만, 방위각 ϕ가 증가할수록 터널출구 주변 조건에 상관없이 감소하였음. 이는 터널출구 주변 조건에 상관없이 열차진행 방향에서 미기압파의 최대값이 가장 크게 나타났음.
- 터널출구 조건이 U자 형상인 경우에서 터널 미기압파의 시간폭이 상대적으로 평지 조건에 비하여 짧게 나타났음. 이는 터널출구 주변 조건이 평지인 경우보다 U자 형상인 경우에 충격성소음을 수반하는 터널 미기압파가 발생하기 쉬움을 나타냄.
- 평지 지형조건에 비하여 U자 형상의 지형조건에서 열차진행 방향으로 터널 미기압파의 지향성이 강하게 나타났음.
- 방위각들의 변화에 대한 결과로부터 터널출구에서 방사하는 미기압파는 음파와 같이 완전한 구형 형상으로 방사하는 것이 아니라 열차진행 방향으로 지향성을 가지면서 타원형 형태로 방사하는 것을 알 수 있음.

(2) 터널 주변의 민가/구조물에서 발생하는 미기압파

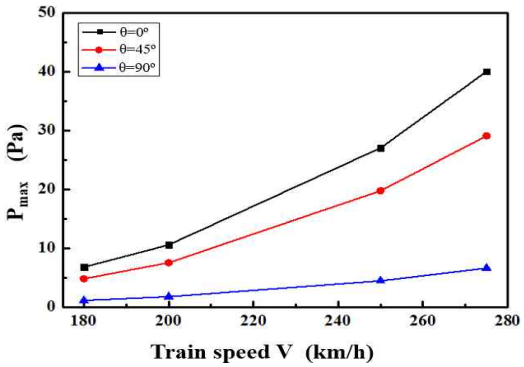
○ 개요

- 열차 속도의 증가는 예상하지 못한 새로운 공학적인 문제를 야기시킴. 고속열차가 터널 입구에 진입하게 되면, 터널 입구에서는 압축파가 발생하여 터널 내부를 음속으로 터널 출구를 향해 전파하여 감. 터널 내부를 전파하는 압축파는 터널 내부 사양에 따라 점성 효과로 인하여 강도는 감쇠하지만, 압력구배는 파의 비선형성(nonlinear effect) 때문에 증가하게 됨. 터널 출구에 도달한 압축파는 일부는 펄스 형태의 미기압파로 방사하고, 나머지는 팽창파(expansion wave)로 바뀌어 터널 입구로 반사됨. 한편 터널 출구에서 외부로 방사된 미기압파는 충격성 소음과 저주파 진동을 수반하면서 주변으로 전파함 [Kim, 1994]. 이 때 터널 출구 주변에 민가가 있는 경우 간헐적으로 전파되어져 오는 미기압파에 의해 심각한 소음 환경문제를 겪게 됨. 따라서 이는 반드시 해결해야 할 공학적 문제임이 틀림없음.
- 종래 많은 연구로부터 충격성 소음을 수반하는 미기압파의 크기는 터널 입구에서 발생되어, 터널 내부를 전파하여 터널 출구에 도달하는 압축파의 시간에 대한 최대압력구배의 크기에 비례하는 것이 밝혀짐. 그래서 고속열차를 채택하고 있는 나라에서는 미기압파의 크기를 저감하기 위하여 압축파를 제어하는 다양한 방법을 시도하여 오고 있음 [Iida et al., 2006].
- 미기압파 저감에 대한 대부분의 연구는 터널 내부를 전파하는 압축파를 제어하는 것에 집중되어져 있음. 터널 출구에서 발생한 미기압파의 방사 특성에 대한 연구는 매우 적은 상태임.
- 따라서 본 연구는 열차속도가 250km/h이하급의 상용고속철도에 관한 것으로, 터널 출구의 주어진 지형조건과 터널 출구로부터 떨어진 특정 위치들에서 열차 속도가 180, 200, 250, 275 km/h로 변화하는 경우, 터널 출구로부터 방사하는 미기압파의 3차원 방사 특성을 조사하기 위하여 수치해석을 수행하였음.

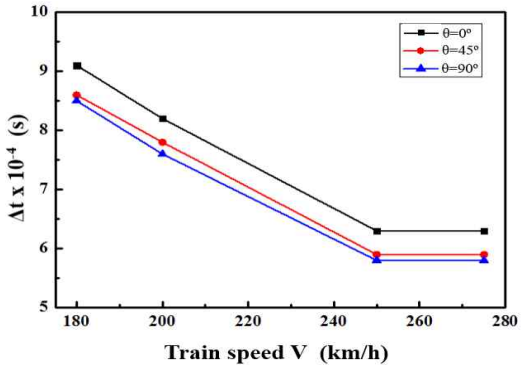
○ 열차진입속도의 영향



<그림 2.3.15c 미기압파의 개략도>



(a) 미기압파 최대값



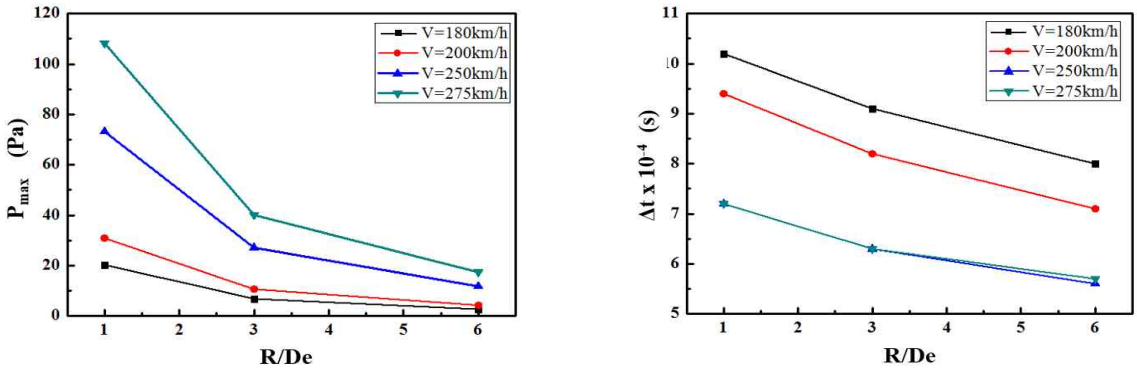
(b) 미기압파의 시간폭

<그림 2.3.16c 열차속도에 대한 미기압파의 특성 (R/De=3, ϕ=0°)>

- 충격성 소음을 수반하는 미기압파는 종래 연구에 따르면 미기압파의 최대값과 압력파형의 시간폭에 의존하였음. 즉, 미기압파의 최대값이 증가하고, 압력파형의 시간폭이 감소할수록 충격성 소음을 가진 미기압파가 발생하였음. 그림 2.3.15c에서는 미기압파를 분석하기 위한 개략도를 나타내었음. 그림에서 미기압파의 최대값을 Pmax로 하였으며, 미기압파의 최대값이 1/2 되는 지점에서의 시간폭을 Δt로 정하였음. 그림 2.3.16c에 R/De=3인 위치에서 방위각 ϕ=0° 이고 다른 방위각 θ=0° , 45° , 90° 인 경우, 열차 진입속도에 따른 터널 출구에서 방사하는 미기압파의 특성을 알아보기 위하여 미기압파의 최대값과 파형의 시간폭을 나타내었음. 그림으로부터 미기압파의 최대값은 방위각 θ 값에 관계없이 열차 진입속도가 증가하는 경우 증가하였음. 또한 **열차 진입속도에 상관없이 방위각 θ=0° 에서 미기압파의 최대값이 가장 크게 나타났으며, θ가 증가할수록 미기압파의 최대값이 감소하였음.** 즉 터널 출구로부터 일정한 거리에서 측정한 미기압파의 최대값은 열차진행 방향에서 가장 크게 나타났으며, 측면으로 각도를 증가시키는 경우 급격하게 미기압파의 최대값이 감소하였음. 한편 미기압파 압력파형의 시간폭은 θ 값에 관계없이 열차 진입속도가 250km/h까지는 감소하다가, 열차 진입속도가 그 이상으로 증가하더라도 일정한 값을 가짐. 이는 미기압파의 압력파형이 열차속도가 고속화되면서 일정한 형상의 파형을 가지는 것으로 판단됨. 그러나 θ가 증가하는 경우 시간폭은 감소하였음. 따라서 **터널 출구에서 방사하는 미기압파는 열차 속도가 증가함에 따라 열차 진행 방향(θ=0° , ϕ=0°)에 대하여 지향성을 가지는 것을 알 수 있음.**

○ 터널출구로부터 거리의 영향

- 터널 출구에서 방사한 미기압파가 주변으로 전파하는 경우, 터널 출구로부터 떨어진 거리에 따라 어떤 특성을 가지는 알아보기 위하여, R/De=1, 3, 6의 위치에서 미기압파의 최대값과 그 압력파형의 시간폭을 그림 2.3.17c에 나타내었음. 여기에서 방위각은 열차진행 방향(θ=0° , ϕ=0°)에 한정하였음. 그림으로부터 **미기압파의 최대값은 열차 속도에 상관없이 터널 출구로부터 멀어질수록 급격하게 감소하였음.** 특히 근거리 구간(R/De=1~3)에서 급격히 감소되며, 원거리 영역(R/De=3 이상)에서는 감소가 둔화되었음.



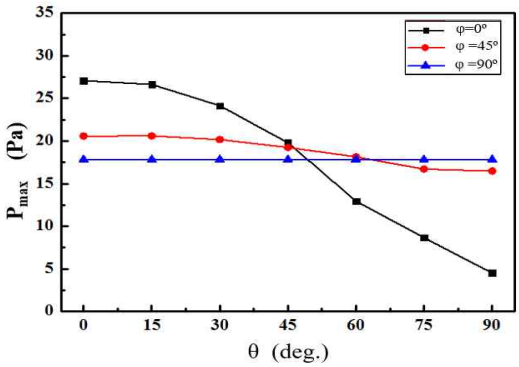
(a) 미기압파 최대값 (b) 미기압파의 시간폭

<그림 2.3.17c 터널출구로부터 거리에 따른 미기압파의 최대값 (θ=0°, ϕ=0°)>

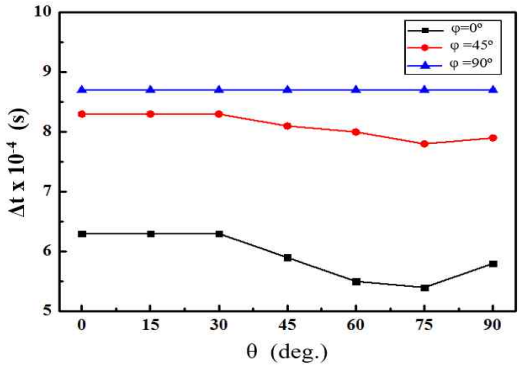
- 한편, 미기압파 압력파형의 시간폭은 열차 진입속도에 상관없이 터널 출구로부터 거리에 따라 감소하였으며, 시간폭의 크기는 열차 진입속도가 증가할수록 감소하다가, 열차 진입속도가 250 km/h 이상에서는 거의 일정하게 유지되었음.

○ 방위각의 영향

- 열차 진입속도가 250km/h 이고, 터널 출구로부터의 거리 R/De=3의 위치에서 방위각에 따른 방사 미기압파의 특성을 알아보기 위하여 미기압파의 최대값과 그 압력파형의 시간폭을 그림 2.3.18c와 그림 2.3.19c에 나타내었음. 그림 2.3.18c에서 방위각 ϕ=0° 인 경우, 미기압파의 최대값은 방위각 θ가 작은 경우에는 완만하게 감소하다가, θ가 증가할수록 급격하게 감소하였음. 그러나 ϕ=45° 와 90° 인 경우에서는 미기압파의 최대값은 θ값에 상관없이 거의 일정하게 유지되었음. 또한 미기압파 압력파형의 시간폭은 θ값에 상관없이 ϕ=0° 에서 가장 작게 나타났으며, ϕ가 증가 할수록 시간폭도 증가하였음. 따라서 **터널 출구로부터 방사되는 미기압파는 음향학적 이론에 기초한 동일한 압력파형을 가지면서 완전 구형 형태로 주변으로 전파되는 것이 아니라 열차 진행방향으로 지향성을 가지면서 주변으로 전파하는 것을 알 수 있음.**
- 그림 2.3.19c에서 θ=0° 인 경우, 미기압파의 최대값은 방위각 ϕ가 증가함에 따라 감소하였으며, θ=45° 에서는 거의 일정한 값을 유지하지만, θ=90° 에서는 증가하다가 일정한 값에 수렴하였음. θ=90° 의 경우에서 ϕ값에 따라 측정점이 배플판 위에 존재함으로써, 미기압파의 최대값이 크게 나타났음. 즉 θ=90° 이면서 ϕ=0° ~30° 범위에서는 측정점이 배플판 바깥쪽에 존재함으로써, 미기압파의 최대값이 상대적으로 작게 나타났음. 한편 미기압파 압력파형의 시간폭은 θ값에 상관없이 ϕ가 증가할수록 증가하다가, ϕ=60° 이상에서는 거의 일정한 값에 수렴하였음.

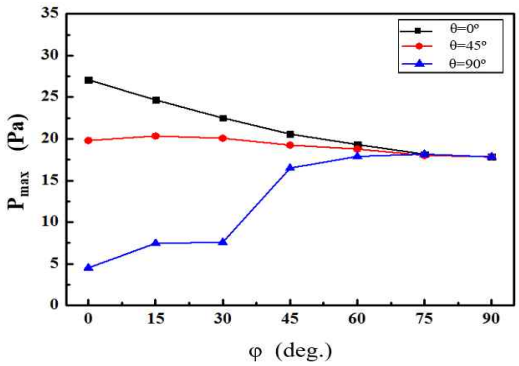


(a) 미기압파 최대값

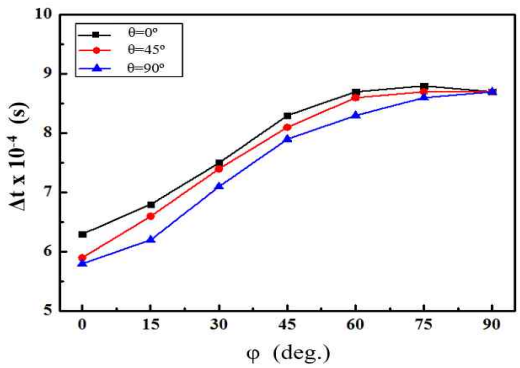


(b) 미기압파의 시간폭

<그림 2.3.18c 방위각 θ에 따른 미기압파 전파특성 (V=250km/h, R/De=3)>



(a) 미기압파 최대값



(b) 미기압파의 시간폭

<그림 2.3.19c 방위각 ϕ에 따른 미기압파 전파특성 (V=250km/h, R/De=3)>

○ 결론

- 열차 진입속도에 상관없이 방위각 θ=0° 에서 미기압파의 최대값이 가장 크게 나타났으며, θ가 증가할수록 미기압파의 최대값이 감소하였음.
- 미기압파의 최대값은 열차 속도에 상관없이 터널 출구로부터 멀어질수록 급격하게 감소하였음.
- 방위각 ϕ=0° 인 경우, 미기압파의 최대값은 방위각 θ가 작은 경우에는 완만하게 감소하다가, θ가 증가할수록 급격하게 감소하였음. 또한 미기압파 압력파형의 시간폭은 θ 값에 상관없이 ϕ=0° 에서 가장 작게 나타났으며, ϕ가 증가 할수록 시간폭도 증가하였음.
- 터널 출구로부터 방사되는 미기압파는 음향학적 이론에 기초한 동일한 압력파형을 가지면서 완전 구형 형태로 주변으로 전파되는 것이 아니라 열차 진행방향으로 지향성을 가지면서 주변으로 전파하였음.

2.4 250km/h급 2세대 후드의 공기역학적 성능평가 및 모니터링 기술개발

가. 3D CFD해석에 의한 고효율 후드구조체의 공기역학적 성능평가기법 개발

(1) 해석방법의 적합성

(가) 해석프로그램

- ANSYS FLUENT 17.2ver

(나) 지배방정식

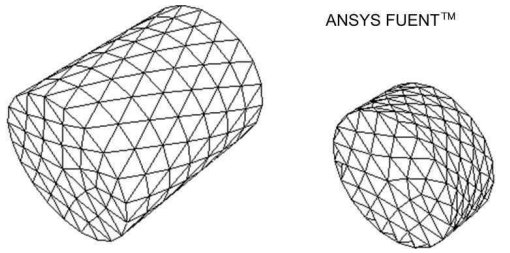
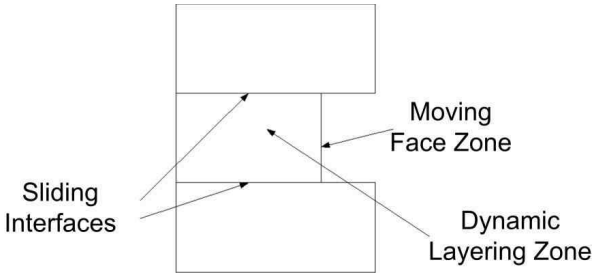
- 열유동해석에 필요한 방정식은 질량, 운동량, 에너지 보존법칙을 적용하여 얻어진 비선형 연립 편미분 방정식을 사용하며, 유동을 해석하기 위하여 기본이 되는 방정식으로 Navier-Stokes 방정식을 기본으로한 유한체적법 (Finite Volume Method)를 사용하여 해를 구하며 기본식은 아래의 표와 같음.

<표 2.4.1a 지배방정식>

구분	방정식
기본지배 방정식	$\frac{D}{D_t}(n\overline{\Phi}) + \frac{\partial}{\partial_{x_j}}(nc_j) + n\overline{\Phi}\frac{\partial_{V_j}}{\partial_{x_j}}$ $= n\{\frac{\overline{D\Phi}}{D_t} + c_j\frac{\overline{\partial\Phi}}{\partial_{c_j}} + \frac{\overline{\partial\Phi}}{\partial_{c_j}}\left(F_j - \frac{D_{V_j}}{D_t}\right) - c_j\frac{\overline{\partial\Phi}}{\partial_{ci}}\frac{\partial_{V_j}}{\partial_{x_j}}\right\}$
질량보존 방정식	$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m$ S_m : 화학반응에 의한 질량 source항
운동량보존 방정식	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i$ p : 정압, τ_{ij} : 응력텐서 (stress tensor) $\tau_{ij} = \left[\mu\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right] - \frac{2}{3}\mu\frac{\partial \mu_l}{\partial x_l}\delta_{ij}$
k-ω 난류모델의 난류방정식	$R_{ij} = -\rho\overline{u'_i u'_j} = \mu_r\left(\frac{\partial\overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial\overline{u_j}}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\mu_T\frac{\partial\overline{u_k}}{\partial x_k}\delta_{ij} - \frac{2}{3}\rho k\delta_{ij}$ $\mu_t = \alpha^*\rho\frac{k}{\omega}$ $\rho\frac{Dk}{Dt} = \tau_{ij}\frac{\partial\overline{u_i}}{\partial x_j} - \rho\beta^* f_{\beta^*} k\omega + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]$ $\rho\frac{D\omega}{Dt} = \alpha\frac{\omega}{k}\tau_{ij}\frac{\partial\overline{u_i}}{\partial x_j} - \rho\beta f_\beta\omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}\right)\frac{\partial\omega}{\partial x_j}\right]$ $\omega \approx \frac{\epsilon}{k} \propto \frac{1}{\tau}$

(다) 해석방법 선정

<표 2.4.2a Dynamic Mesh 해석방법>

Dynamic Mesh	Dynamic Layering
	
• 해석 공간의 동적 변화에 대응 할 수 있는 모델	• 열차의 운동 구현에 적합한 선형 변화구현 방법

<표 2.4.3a Dynamic Mesh를 이용한 터널과 열차구현방법>

구분	Fluent Dynamic Mesh - Layering scheme
열차 주행모델 개요도	
	• 고정된 터널 내 · 외부 및 열차의 이동에 따라 변형하는 해석 공간을 구성하여 결합

(라) Viscosity Model 선정

○ 선정 Model : k-omega, SST

○ 선정이유

- 대부분의 일반적인 해석 진행시 Realizable k-e 모델이나 SST k-w 모델 선호
- Transition 해석의 경우 k-w(k-omega) 모델이 k-e 모델보다 정확도가 높음
- 터널 벽과 같은 경계층의 계산 중요도가 높은 경우 k-w 모델과 k-e 모델의 장점을 결합한 SST k-w 모델이 적합하다고 판단됨
- ANSYS에서 제공되는 ‘Fluent_Intro_17.0_Lecture’ 수록 내용참조

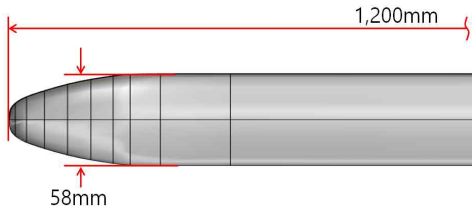
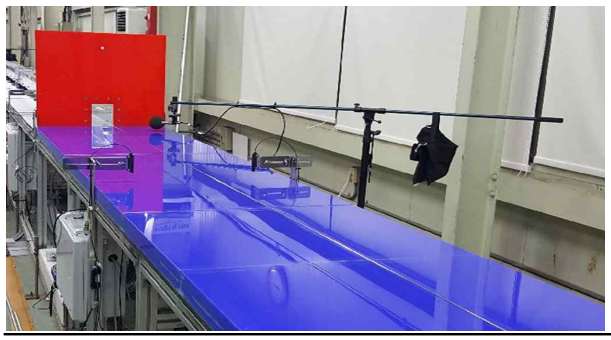
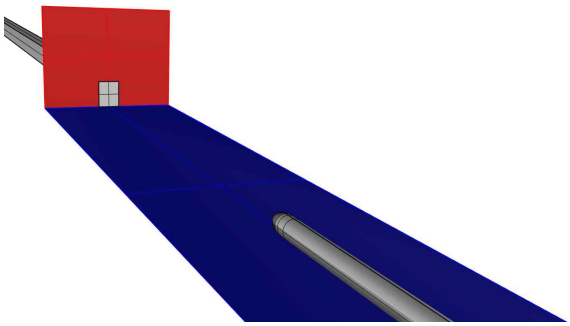
(마) Solution Model 선정

○ 선정 Model : PISO

- Pressure-based Solver를 사용하며 Transient 해석을 진행하는 경우 PISO 모델을 권장함
- ANSYS에서 제공되는 'Fluent_Intro_17.0_Lecture' 수록 내용참조

(바) 축소모형 실험데이터와 비교해석 모델

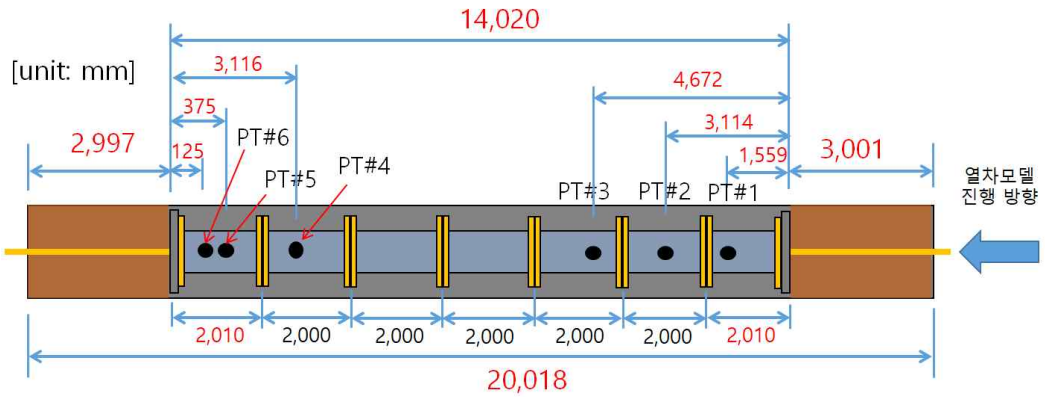
<표 2.4.4a 열차 및 터널 축소모델>

실측모델	3D 모델링
	
	

(사) 측정 데이터 지점 (축소모형 실험데이터와 비교)

<표 2.4.5a 압력측정위치>

차압센서 설치위치



- PT#1~6 총 6개의 차압 센서 중 입구부분 3개의 측정 포인트 결과 비교
- 축소모형 실험과 CFD 해석의 열차 초기 위치 차이로 측정 시간에 0.028초의 차이 발생 (그래프 x축)

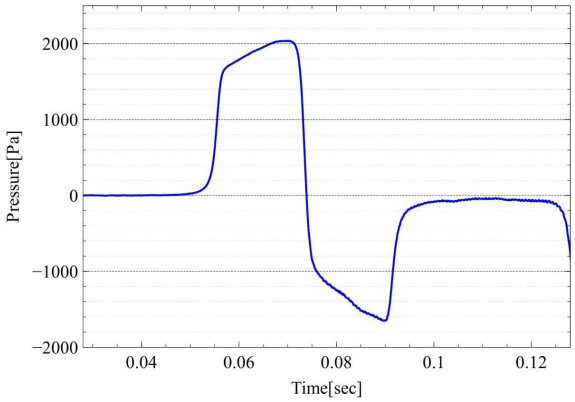
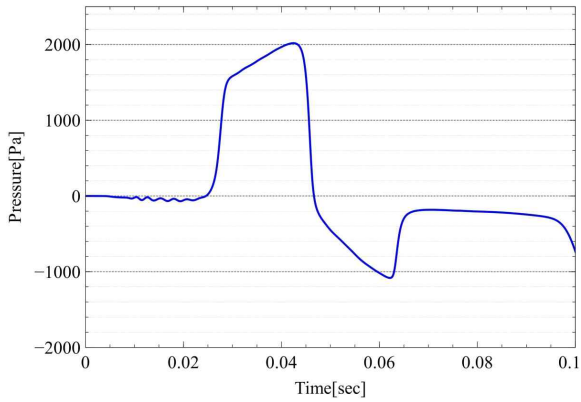
(2) 단면별, 갱문 형상별 후드의 성능평가

(가) 축소모델 실험과의 비교결과를 위한 해석방법 제시

- 1차년도 실험과 해석결과의 최대압력 오차율은 최대 16.8%로 분석됨. 2차년도 중간평가에서 제시된 오차율 15% 달성을 위하여 해석신뢰성 향상기술을 적용함.(1차년도 정성적 성과점검보고서(D-1-1)를 3차년도에 보강하여 상세 분석내용 첨부함.)

(나) 위치별 측정결과와 해석결과와의 비교

<표 2.4.6a 1.56m 지점(PT #1)>

모형실험	CFD 해석
	
• 압력파 최대값 : 2,038.46 Pa	• 압력파 최대값 : 2,017.89 Pa
• 모형실험 기준 오차범위 : 1.01% < 15.00% (기준만족)	

<표 2.4.7a 비교결과>

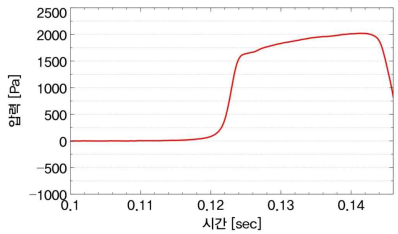
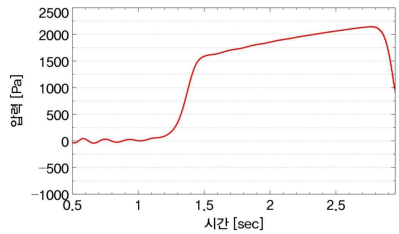
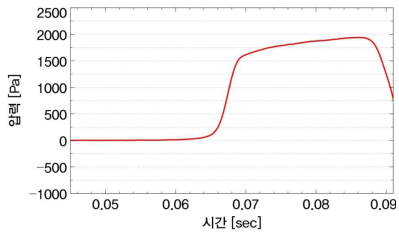
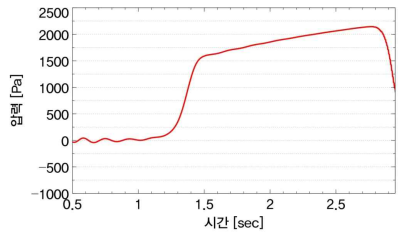
성과지표	목표치	측정지점	측정압력 최대값[Pa]		오차율	
			모형실험	CFD해석		
3D CFD 해석방법의 적합성	실험치 대비 오차율 최대 15% (3차년도)	1.56m	2,038.46	2,017.89	1.01% < 15.0%	만족
		3.11m	2,116.67	1,981.02	6.41% < 15.0%	만족
		4.67m	2,027.21	1,949.32	3.84% < 15.0%	만족

- 열차 터널 진입 시 미기압에 큰 영향을 미치는 압력파의 최대값을 비교해 보면 측정지점에 따른 오차율이 각각 1.01%, 6.41%, 3.84%로 기준을 넘지 않는 값이 산출되어 수치해석의 신뢰성이 검증됨.
- 1차년도 압력파 최대값 오차율은 최대 16.80%, 2차년도는 25.34%이며, 3차년도에서는 6.41%로 산출됨. 특히 동일한 실험결과와 비교한 1, 3차년도 수치해석 결과에서 오차율 16.8%에서 6.41%로 감소시켜 해석기법의 신뢰성을 향상시킴.

(3) 단면별, 갱문 형상변경에 따른 해석 신뢰성 평가

(가) 축소모델 실험과의 비교결과를 통해 해석 신뢰성 검증

<표 2.4.8a 갱문 형상별 측정결과와 해석결과와의 비교>

구분	모형실험	CFD 해석
면벽식 갱문		
	• 압력파 최대값 : 2,020.7 Pa	• 압력파 최대값 : 2,145.2 Pa
경사형 갱문		
	• 압력파 최대값 : 1,940.0 Pa	• 압력파 최대값 : 2,178.5 Pa
• 면벽식 갱문 모형실험 기준 오차범위 : 6.20% < 15.00% (기준만족) • 경사형 갱문 모형실험 기준 오차범위 : 12.3% < 15.00% (기준만족)		

<표 2.4.9a 비교결과>

성과지표	목표치	입구형상	측정압력 최대값[Pa]		오차율	
			모형실험	CFD해석		
3D CFD 해석방법의 적합성	실험치 대비 오차율 최대 15% (3차년도)	면벽식 갱문	2,020.7	2,145.2	6.20% < 15.0%	만족
		경사형 갱문	1,940.0	2,178.5	12.3% < 15.0%	만족

- 열차 터널 진입 시 터널입구 형상에 따른 미기압에 큰 영향을 미치는 압력파의 최대값을 비교해 보면 측정 지점에 따른 오차율이 각각 6.20%, 12.3%로 기준을 넘지 않는 값이 산출되어 수치해석의 신뢰성이 검증됨.(1차년도 정성적 성과점검보고서(D-1-2)를 3차년도에 보강하여 상세 분석내용 첨부함.)

(4) 3D CFD해석에 의한 고효율 후드구조체의 공기역학적 성능평가기법 검토 결과

- 3D CFD해석에 의한 후드구조체의 공기역학적 성능평가기법 개발을 위해, 3D CFD해석과 모형실험 압력파 최대값을 비교한 결과, 오차율 15% 이내에서 만족함.

나. 본선 TEST-BED터널 및 시험용 후드 구조체의 중앙모니터링 S/W 작성 및 구축

(1) 개발의 개요

○ 본 SW는 현장시험에서 측정된 데이터를 원거리에 위치한 모니터링 PC에서 실시간으로 신호를 전송받아 저장하고 그래프로 도시함으로서 모형실험 및 현장시험시 취득되는 데이터를 즉각적으로 확인하고자 하는 목적이 있다.

○ 이 SW의 주요 기능은 다음과 같다.

- 수집된 데이터를 사용자가 인식하기 쉬운 그래프 형태로 제공한다.
- 제공되는 그래프는 수집된 데이터 종류에 따른다.
- 미기압, PCB 압력, ENDEVCO 압력, 포토 센서, 열선 유속, 온도, 소음에 대한 데이터 값을 그래프로 제공한다.

(2) 데이터 및 그래프 처리절차

① 데이터 처리절차

- 시간 및 수집 데이터 개수에 따른 내부 자료구조 할당. 이전 실행으로 기 할당된 자료구조가 있을 경우 반환 후 재 할당.
- 할당된 자료구조의 초기화. 개수 관련 자료구조는 0, 데이터 값을 저장하는 자료구조는 NULL로 초기화 진행.
- 수집된 바이너리 데이터를 텍스트 형태로 변환 처리.
- 변환된 텍스트 데이터를 할당된 내부 자료구조에 저장. 효율적인 처리를 위하여 시간 정보와 측정된 값을 분리하여 저장.
- 측정된 값 중 최소 및 최대 값 저장.
- 데이터 수집 주기에 따른 최소 및 최대 시간 정보 저장.

② 그래프 그리기 절차

- 그래프 영역 설정.
- 그래프 콘트롤 정보 할당.
- 그래프용 컬러 정보 및 폰트 정보 초기화. 그래프 콘트롤 정보 관련 변수들 초기화. 그래프 시간 및 측정 값 범위 초기화 등 처리.
- 그래프 영역에 대한 윈도우 생성.

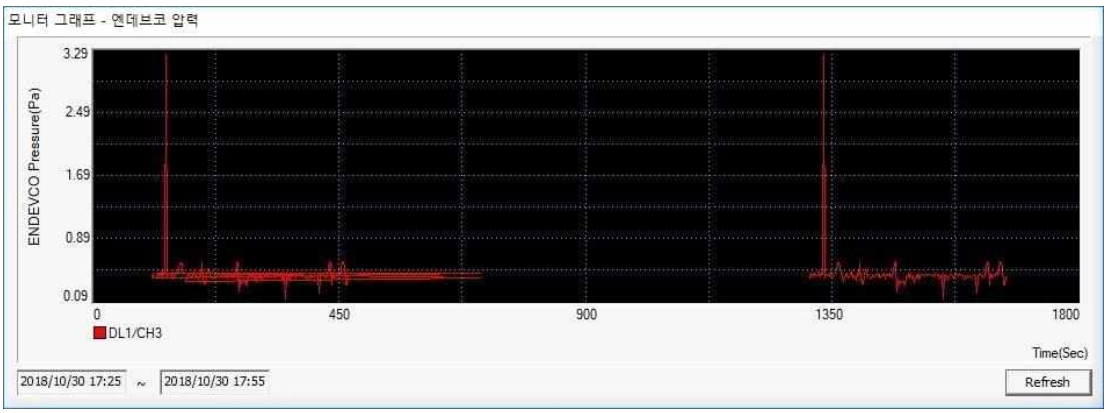
- 그래프 영역에 대한 범위 설정.
- 그래프 콘트롤의 X축(시간) 및 Y축(측정된 데이터 종류) 정보 설정.
- 그래프 영역에 대한 그리드 선 개수 설정.
- 그래프 콘트롤의 시간 및 측정 값 범위 설정.
- 그래프 콘트롤의 간격, 픽셀 위치 설정.
- 측정 값 개수에 따른 레이블 이름 및 컬러 설정.
- 설정된 그래프 콘트롤 정보를 이용하여 측정 값 위치 결정.
- 결정된 위치를 라인으로 연결하여 그래프 완성.

③ 상세그래프 그리기 절차

- 상세 그래프는 모니터링이 동작 중인 경우와 그렇지 않은 경우 구분하여 처리한다. 모니터링이 동작 중인 경우는 주기적으로 처리하는 시간을 기반으로 동작한다. 모니터링이 정지된 상태에서는 검색기간에 대한 정보가 있어야 하며, 이를 기반으로 관련 정보를 처리하여 상세 그래프 기능을 제공하게 된다.
- 상세 그래프 윈도우 생성.
- 상세 그래프로 제공할 센서 종류 처리. 제공되는 센서 정보는 미기압, PCB 압력, ENDEVCO 압력, 포토 센서, 열선 유속, 온도, 소음으로 일반 그래프 정보와 동일하다.
- 상세 그래프 내부 자료구조 할당.
- 할당된 자료구조 및 각종 변수의 초기화.
- 상세 그래프 영역 설정.
- 상세 그래프 콘트롤 정보 할당 및 초기화.
- 상세 그래프 영역에 대한 윈도우 생성.
- 사용자가 원하는 상세 그래프 정보 입력 및 요청.
- 상세 그래프용 데이터 저장.
- 상세 그래프 콘트롤의 X축(시간) 및 Y축(측정된 데이터 종류) 정보 설정.
- 상세 그래프 영역에 대한 그리드 선 개수 설정.
- 상세 그래프 콘트롤의 시간 및 측정 값 범위 설정.
- 상세 그래프 콘트롤의 간격, 픽셀 위치 설정.
- 상세 그래프 데이터 개수에 따른 레이블 이름 및 컬러 설정.
- 설정된 상세 그래프 콘트롤 정보를 이용하여 측정 값 위치 결정.
- 결정된 위치를 라인으로 연결하여 상세 그래프 완성.

④ 데이터 출력

- ENDEVCO 압력



<그림 2.4.1b ENDEVCO 압력>

(3) S/W 사용법

① 실행

- MonitorSW.exe 실행



<그림 2.4.2b 입력창>

- 메인화면 좌측 하단의 타이머 구동 버튼을 누르면 사용자가 지정한 주기에 따라 등록된 데이터 로거 정보를 기반으로 모니터링 S/W 동작. 즉, 5분 주기로 설정된 경우, 타이머 구동 후 5분이 지난 경우에 최초의 수집 동작이 발생하여, 해당 주기로 데이터 수집
- 모니터 그래프 창은 데이터 로거 정보에 등록되면 타이머 구동 시 자동으로 실행되며, 설정 시 또는 모니터링 S/W 종료 시 창 닫힘.

② 그래프 그리기

- 그래프를 그리는 시점은 모니터링 S/W가 주기적으로 데이터를 수집하는 경우, 해당 데이터가 수집되는 시점에 그래프 생성.
- 시간이 지남에 따라 해당 데이터가 존재하지 않는 경우, 파일명과 모니터 그래프 창은 아무 데이터가 출력되지 않음.

③ 상세그래프 및 데이터 추출

- 메인화면 우측 하단의 상세 그래프 버튼을 누르면 시작. 상세 그래프 창에서 그래프 종류를 선택하고 그래프 기간을 지정한 다음, 그리기 버튼을 누르면 해당 그래프 출력
- 해당 그래프의 데이터 추출을 원하면 데이터 저장 버튼 클릭
- 추출된 데이터는 데이터 저장 버튼을 누르면 저장. 데이터는 사용자가 설정 창에서 지정한 위치에 저장. 파일 이름은 수집된 파일명에 해당 그래프가 그려진 시간과 종류로 설정되며, CSV 확장자인 엑셀 포맷형태로 저장됨

④ 설정 및 저장

- 측정하고자 하는 장비를 미리 설정 필수. 설정되지 않은 장비에서 생성되는 바이너리 데이터는 그래프로 제공되지 않음
- 데이터 로거는 최대 4개를 할당할 수 있으며, 데이터 로거 당 최대 6개의 채널에 측정하고자 하는 센서를 할당 가능. 할당은 해당 센서를 선택하면 되며, 센서를 제외할 경우, 탈장을 선택
- 모니터링 시간은 수집된 바이너리 데이터를 보여주는 기간(모니터링 기간)과 바이너리 데이터를 수집하기 위한 주기(타이머)를 설정 가능. 모니터링 기간은 10분, 30분, 60분에서 선택할 수 있으며, 디폴트 값은 30분. 타이머 주기는 3분, 5분, 10분에서 선택할 수 있으며, 디폴트 값은 5분
- 폴더 정보는 수집된 바이너리 데이터가 저장되는 위치와 상세 그래프의 추출된 데이터를 저장하는 위치를 설정 가능
- 사용자 정의값은 수집된 바이너리를 데이터를 변환하거나 계산하기 위해 사용되는 정보이며 미입력 시 디폴트 값으로 설정
- 설정된 정보 저장은 메인화면 가운데 하단의 저장 버튼을 누르면 모니터링 S/W가 위치한 폴더의 Config 폴더에 저장

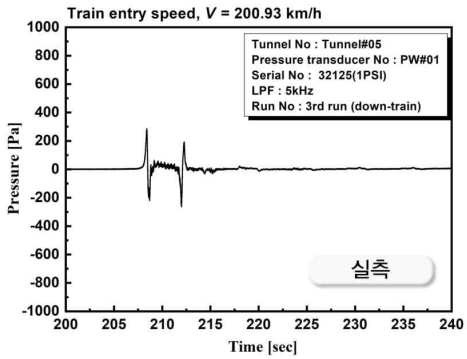
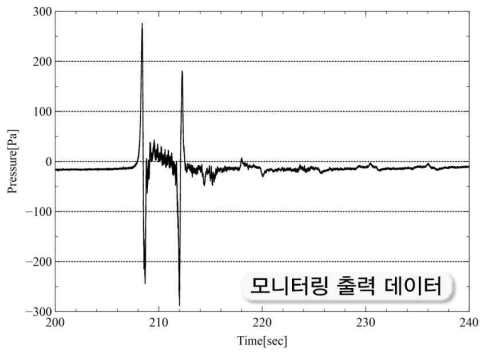
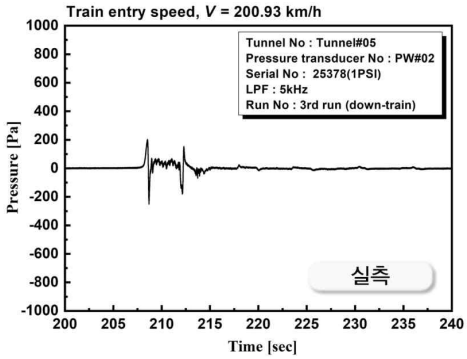
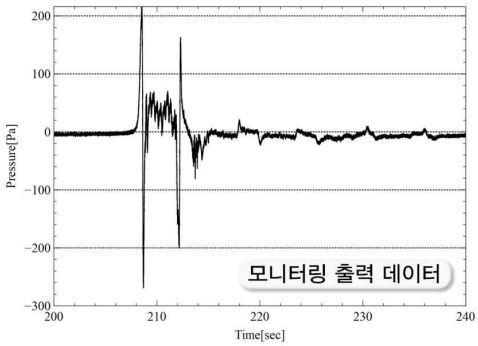
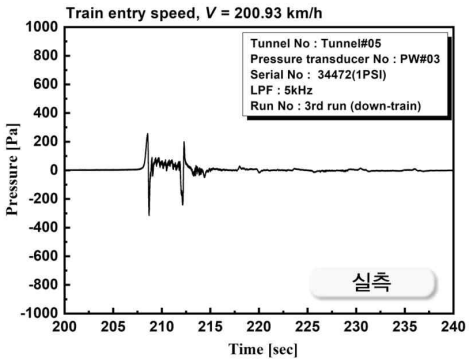
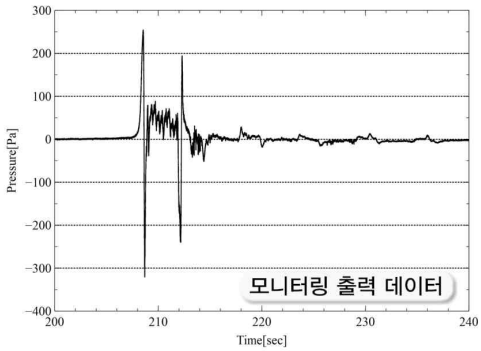
⑤ 데이터 비교(실측 VS 모니터링 S/W)

- 상세그래프 추출기능을 활용한 프로그램의 정상적인 데이터 변환을 확인하기 위해 실측값과 비교 및 검증(3차년도 정성적 성과점검보고서(D-2-1)에 상세 분석내용 첨부함.)

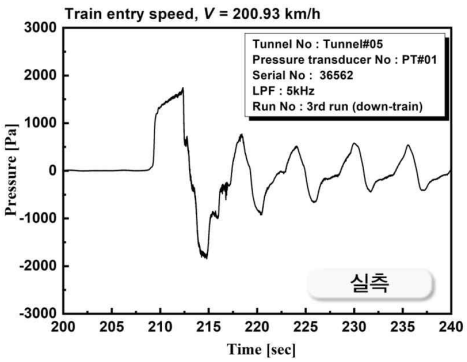
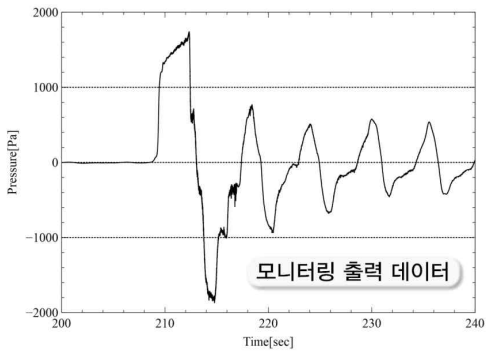
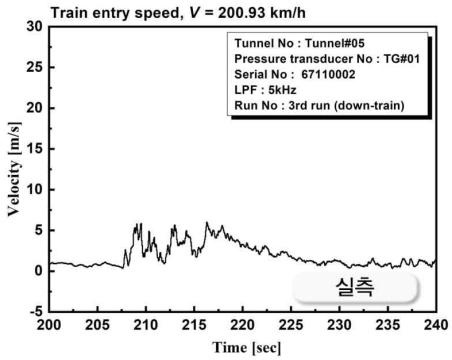
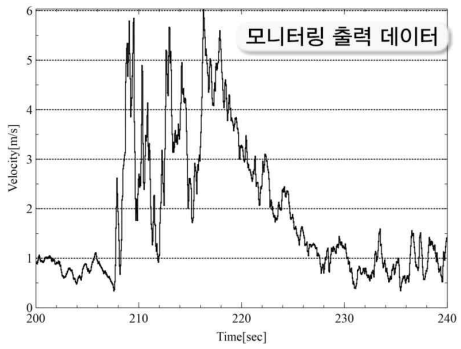
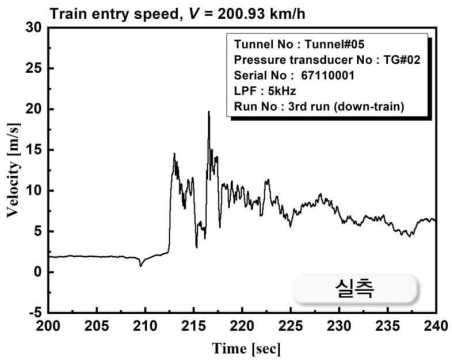
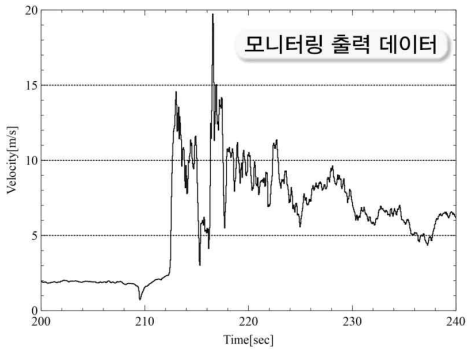
<표 2.4.1b 데이터 비교대상 및 물리량>

계측구분	PW#01	PW#02	PW#03	PT#01	TG#01	TG#02
계측센서	엔데브코 압력센서	엔데브코 압력센서	엔데브코 압력센서	엔데브코 압력센서	열선유속계	열선유속계
물리량	압력(Pa)	압력(Pa)	압력(Pa)	압력(Pa)	속도(m/s)	속도(m/s)

<표 2.4.2b 데이터 비교결과(PW)>

구분	현장실측데이터	모니터링S/W 출력데이터
PW#01		
PW#02		
PW#03		

<표 2.4.3b 데이터 비교결과(PT&TG)>

구분	현장실측데이터	모니터링S/W 출력데이터
PT#01		
TG#01		
TG#02		

- 현장시험 로거데이터 “AUTO_20191212_113344_T5_3run_downtrain” 사용
- 좌측은 실측데이터, 우측은 프로그램에 의해 변환된 데이터를 그래프로 나타냄

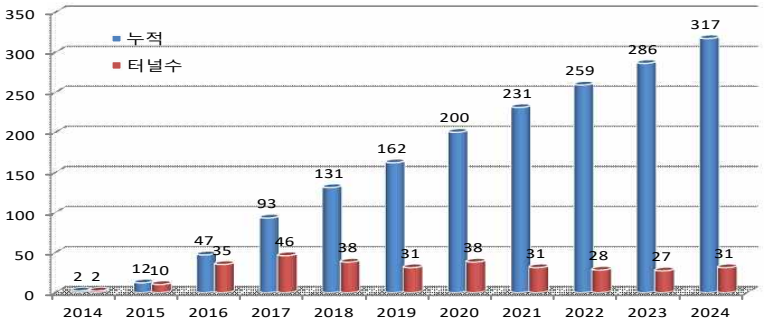
(4) 중앙모니터링 S/W 작성 및 구축 검토 결과

- 현장시험에서 측정된 데이터를 원거리에 위치한 모니터링 PC에서 실시간으로 신호를 전송받아 저장하고 그래프로 도시하는 S/W 작성함
- 실측과 프로그램으로 생성된 데이터의 추세 및 크기가 서로 일치하는 것으로 확인됨

다. 본선 TEST-BED 및 신규노선 터널들의 사양, 사갱, 기재갱, 터널 주변민가 및 이격거리 도면화, 데이터베이스화

(1) 국내 고속화철도 건설계획 조사 및 정리

- 국내 고속화철도 건설계획은 2011년 제시된 제2차 국가철도망 구축계획과 이를 열차운영측면에서 상세 계획한 한국철도공사의 “중장기 운송전략”에 명시되어 있으며, 2016년 6월에 제3차 국가철도망 구축계획이 새로이 수립되어 있은 상태임.
- 제2차 국가 철도망 구축계획을 바탕으로 조사된 향후 10여년간의 준공되었거나 준공예정인 터널 수는 다음과 같음.



<그림 2.4.1c 철도터널 건설계획>

- 제3차 국가 철도망 구축계획에서 제시된 주요 고속화 노선들은 다음과 같이 조사되었음.

<표 2.4.1c 주요고속화노선 조사결과>

노 선 명		사업구간	사업내용	연장(㎞)	총 사업비(억원)
① 운영효율성 제고사업					
고속	경부고속선	수색~서울~금천구청	복선전철	30.0	19,170
		평택~오송	2복선전철	47.5	29,419
일반	중앙선	용산~청량리~망우	2복선전철	17.3	13,280
	수서광주선	수서~광주	복선전철	19.2	8,935
	경전선	진주~광양	전철화	57.0	1,524
		광주송정~순천	단선전철화	116.5	20,304
	장항선	신창~대야	복선전철화	121.6	7,927
	동해선	포항~동해	전철화	178.7	2,410
	문경·점촌선	문경~점촌~김천	단선전철화	73.0	13,714
	경전선	보성~목포	단선전철화	82.5	1,702
	경북선	점촌~영주	단선전철화	56	980
소계(11개 사업)				799.3	119,365

② 지역거점 간 고속연결 사업

일반	어천 연결선	어천역~경부고속선	복선전철(직결선)	2.4	1,540
	지제 연결선	서정리역~수도권고속선	복선전철(직결선)	4.7	2,800
	남부내륙선	김천~거제	단선전철	181.6	47,440
	강원선	춘천~속초	단선전철	94.0	19,632
	평택부발선	평택~부발	단선전철	53.8	16,266
소계(5개 사업)				336.5	87,678

③ 노후시설 개량 사업

일반	충북선	조치원~봉양	고속화	82.8	4,606
	호남선	가수원~논산	고속화	29.3	4,596
소계(2개 사업)				112.1	9,202

(2) 설계자료 입수 및 DB화 대상노선 현황조사

- 데이터베이스(DB)화 조사대상 노선은 철도종합시험선로, 경전선(보성~임성리), 동해선(포항~삼척), 중부내륙선(이천~문경), 중앙선(도담~영천)등이 있음.
- 1차년도에서는 철도종합시험선로(6개 터널), 경전선(보성~임성리) 3개터널, 동해선(포항~삼척) 3개터널 등 총 12개 터널에 대한 데이터베이스를 구축하였음.
- 2차년도에 원주강릉선(8개 터널), 중부내륙선(4개 터널)에 대한 도면분석을 추가로 진행하여 도면 DB업데이트, 1, 2차년도에 걸쳐 총 24개터널 DB화를 완료함.
- 설계자료의 데이터베이스는 향후 미기압파 저감후드 설치검토에 필요한 제원과 도면을 대상으로 하였음.
- 이에 대한 상세내용은 성과점검 자료집에 수록하였고 별책으로 도면집 및 검색이 가능한 전산파일을 PDF형태로 작성하였음.(1차년도 정성적 성과점검보고서(D-3-1)에 상세분석내용 첨부함.)

<표 2.4.2c 대상터널 선정>

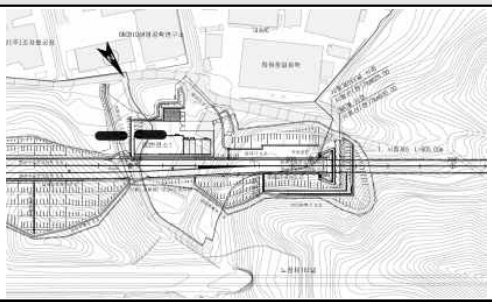
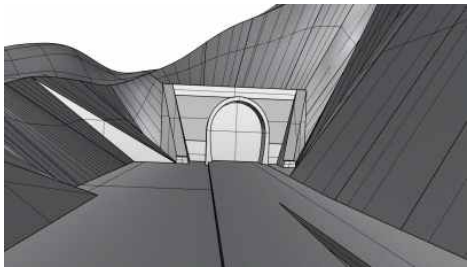
노선명	터널명	연장	형식	경사갱	비고
동해선 (포항~삼척)	금음4	505	단선		영해-후포
	신화	2052	단선		죽변-원덕
	죽변	950	단선		죽변-원덕
경전선 (보성~임성리)	신평1	1050	단선		5공구
	신평2	2200	단선		5공구
	해남	4515	단선	1	5공구
경전선 (보성~임성리)	신평1	1050	단선		5공구
	신평2	2200	단선		5공구
	해남	4515	단선	1	5공구

철도종합 시험선로	시험 제1터널	551	단선		자갈도상
	시험 제2터널	229	단선		자갈도상
	시험 제3터널	1,245	단선		자갈도상
	시험 제4터널	271	복선		자갈도상
	시험 제5터널	905	단선		자갈+콘크리트
	시험 제6터널	1,020	단선		자갈도상
원주~강릉선	의관터널	1,745	복선		콘크리트도상
	둔둔터널	915	복선		콘크리트도상
	우천터널	3,415	복선		콘크리트도상
	정금터널	4,735	복선		콘크리트도상
	둔내터널	7,895	복선	1	콘크리트도상
	면온터널	666	복선		콘크리트도상
	평창터널	8,718	복선	1	콘크리트도상
	대관령터널	21,755	복선	4	콘크리트도상
중부내륙선	태평터널	8,791	단선	1	콘크리트도상
	신대터널	3,980	단선		콘크리트도상
	안보1터널	210	단선		콘크리트도상
	안보2터널	1,120	단선		콘크리트도상

(3) DB화된 도면의 적정성 측정(현장사진과 위성사진 및 도면과의 비교검토)

- 철도종합시험선로 현장조사 및 위성사진, 도면, 3D모델링 대조결과 일치도 100% 달성

<표 2.4.3c 현장사진과 위성사진 및 도면과의 비교검토>

시험5터널 시점평면도(도면DB)	시험5터널 시점위성사진
	
시험5터널 3D 모델링(도면DB)	**시험선로 현장사진**
	

라. 터널 단면적 축소에 따른 예상문제점 분석

(1) 승객 이명감 검토

(가) 연구방법 및 검토기준

○ 이명감 안전 권고치를 만족하는 열차속도-폐색율 그래프를 활용하여 터널 단면적 적합성 검토

○ 이명감 안전 권고치(Medical Health Criterion)

- 열차가 터널을 통과하는 동안, 열차 내부의 승객이 겪게 되는 최대 압력변동이 10 kPa을 초과하지 않아야 함.[UIC CODE 779-11, 2005]

○ 객차내 압력변동과 기밀도 국내외 기준

- 고속열차의 기밀정도는 동적기준과 정적기준이 있으며, 동적기준은 차량주행시 객실내 압력변동의 정도를 평가(1, 3, 10, 60초)하는 방법과 단차 상태인 조건에서 객실내 압력 하강속도를 평가하는 방법으로 나눌 수 있음.

<표 2.4.1d 해외 이명감 검토기준>

해외 기준	UIC-779-11	UIC-660	일본 신간선	영국 Rail link	독일DB
최대압력변화	-	-	1,000Pa		500Pa
1 sec	1,000Pa	1,000Pa	200 Pa		
3 sec		800Pa			800Pa
4 sec	1,600Pa(단독)			2,000Pa(단선) 3,500Pa(복선)	
10 sec	2,000Pa(단독)	1,000Pa			1,000Pa
60 sec		2,000Pa			

※ UIC 779-11 : Determination of railway tunnel cross-sectional areas on the basis of aerodynamic considerations

※ UIC 660 : Measures to ensure the technical compatibility of high-speed trains

- 국내 철도차량에 대한 기밀도는 “현재 철도차량 기술기준(국토교통부,2016)” 에 명시되어 있으며, 국내 최초기준은 “철도차량 안전기준에 관한 지침(국토해양부, 2007)임. 그 이전에 제작된 KTX-1차량의 경우에는 이러한 기준이 미제정된 상태로 열차가 제작되어 투입되었음.

<표 2.4.2d 국내이명감 검토기준>

구분	특징	객차내 압력변동 기준
철도차량 기술기준 (국내)	• KTX-II 차량 기밀도를 감안 (τ=18 이상인 차량에 적용)	• 압력변화율 : 500Pa/s • 3초간의 최대압력변화 : 800Pa/3s • 10초간의 최대압력변화 : 1,000Pa/10s • 60초 이상의 최대압력변화 : 2,000Pa

(나) 해석적 분석방법

<표 2.4.3d 분석프로그램 개요>

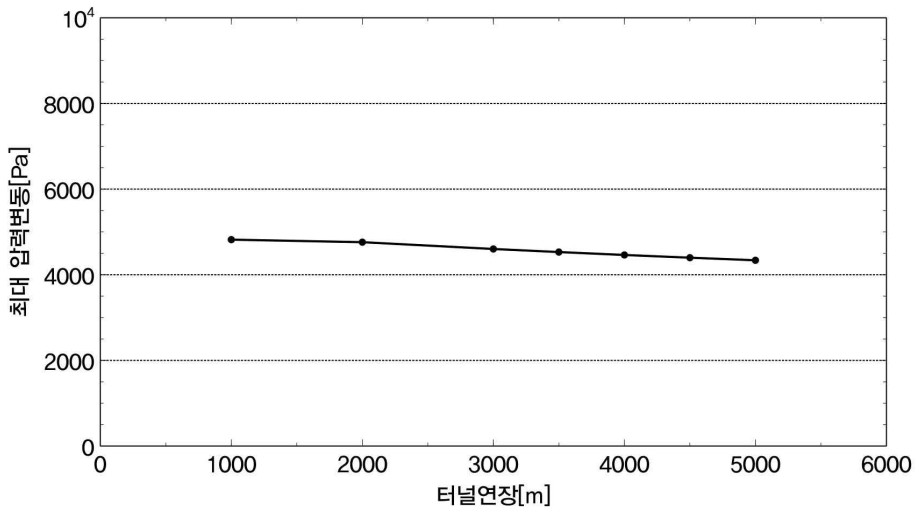
구분	내용
프로그램명	• Thermotun
계산과정	• 고속열차 주행에 의해 발생한 터널내 압력파동의 전파분석 • 터널에 접속한 오프닝에 의해 저감되는 점근압력의 크기 • 열차의 기밀특성을 반영한 차량내부의 압력변동 특성 분석 • 열차의 다양한 구성 및 속도에 대한 검토 가능 • 공기압적 특성 해석 이외의 일반 환기 거동 해석 가능

<표 2.4.4d 해석Case>

터널연장	단면적	열차 종류	열차 속도	열차 길이	열차 단면적	주행 조건	기밀도
1000m ~ 5000m	40.0㎡	EMU250	250km/h	200 m	11.08㎡	단독주행	τ = 0 τ = 18

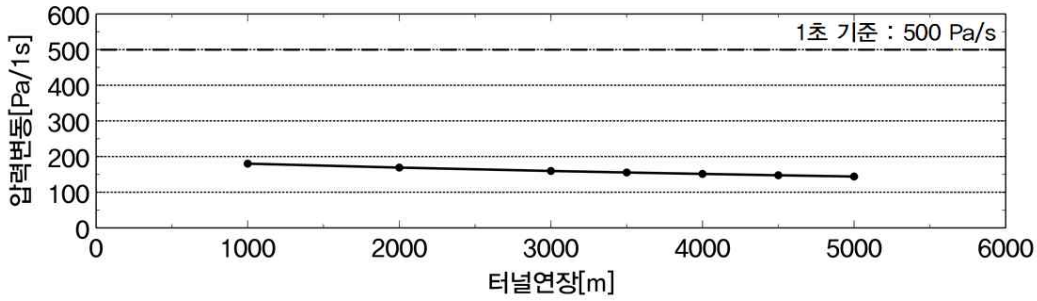
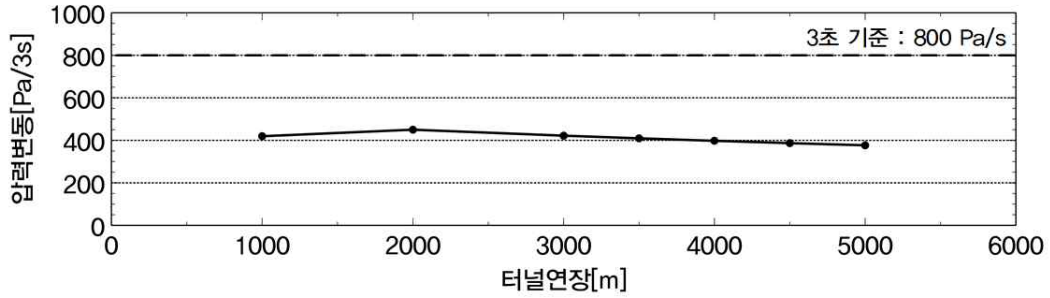
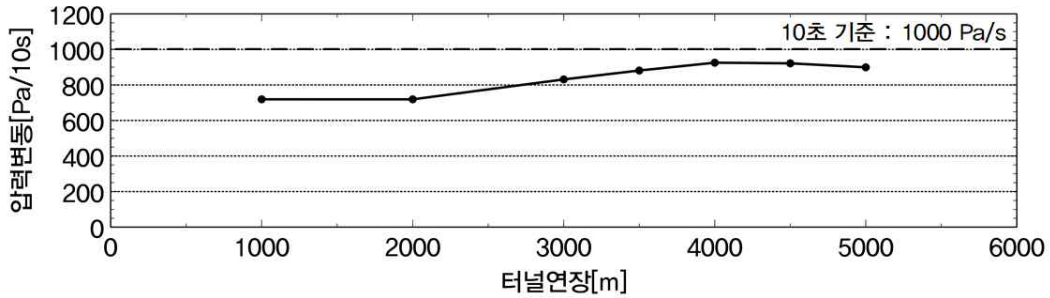
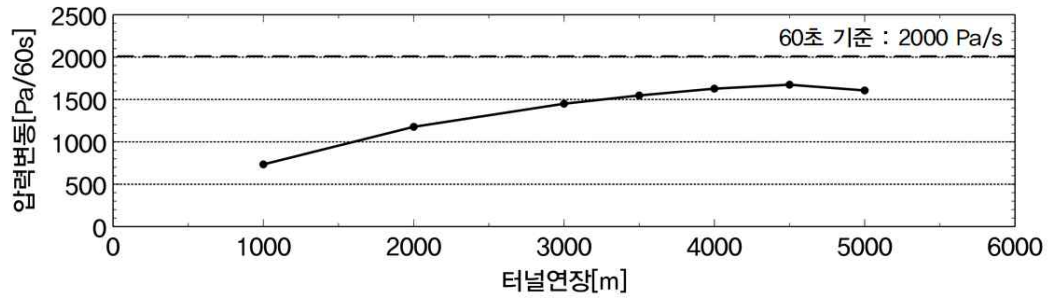
- 1D CFD(ThermoTun)를 활용한 이명감 분석에서, 연장별 시간에 따른 압력변동 그래프를 나타내었을 때 안전 권고치(최대 압력변동 10 kPa이내)를 초과하지 않음.
- 터널 내공단면적 40㎡, 250km/h로 단독주행시, 모든 터널연장에 대해 안전 권고치 만족
- 이명감 안전 권고치에 의하면 터널내 압력변동은 10 kPa를 초과하지 않아야 함. UIC 779-11에서 제시한 그래프와 1D CFD 결과를 바탕으로 검토해볼 때, 최고속도가 250km/h, 터널 단면적이 40 ㎡일 때 안전 권고치 기준 만족.

<표 2.4.5d 1D CFD분석결과>

구 분	1D CFD 분석결과
터널연장별 최대 압력변동 (비기밀 적용)	

- 쾌적기준을 적용한 이명감 분석결과

<표 2.4.6d 압력변화율>

기 준	터널 연장에 따른 압력변동 그래프
1초 기준	
3초 기준	
10초 기준	
60초 기준	

- 1초 기준 이명감 분석에서 터널연장이 증가할수록 압력변동은 감소됨.
- 3초 기준 이명감 분석에서 터널연장이 2000m일 때 압력변동이 최대로 나타났으며 이후 감소하는 추세를 보임.
- 10초 기준 이명감 분석에서 터널연장이 4000m일 때 압력변동이 최대로 나타났으며 10초 이명감 기준은 1000 Pa/10s를 초과하지 않았으나 터널단면적을 축소할 경우 초과할 수 있을 것으로 사료됨.
- 60초 기준 이명감 분석에서 터널연장이 증가할수록 압력변동은 증가하며 4500m일 때 최대로 나타남.

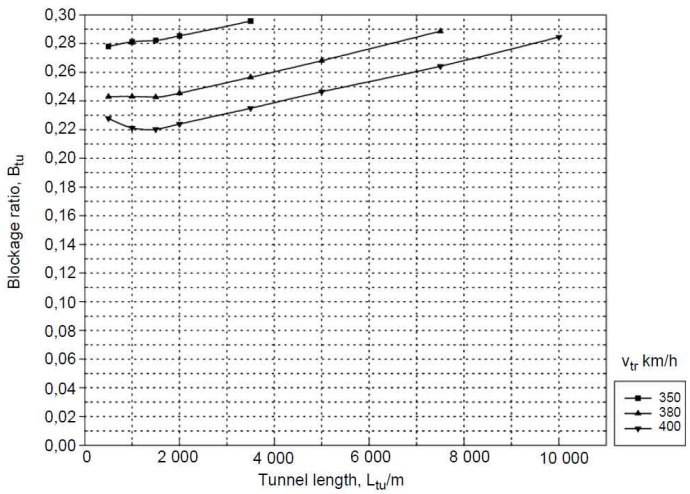
- 터널 내공단면적 40㎡, 250km/h로 단독주행시, 모든 터널연장에서 국내 이명감 기준 만족.
- 공기압적 요인을 고려한 터널 최소 단면적 40㎡ 단면에 대하여 공기압적 적합성을 검토함.
- 안전 권고치 및 쾌적 기준 적용에 의한 이명감 분석에서 해당 단면은 공기압적 측면(이명감)으로 볼 때, 기준 미만으로 나타나 안전한 것으로 분석됨.

(다) UIC의 안전권고치(Medical Health Criterion)적용에 의한 분석

- UIC Code 779-11에서는 단독주행하는 고속열차 운행속도와 터널연장을 적용한 안전권고치를 초과하지 않는 최소 폐색율을 그래프로 나타냄. 이때 터널 내공단면적과 열차단면적의 비를 폐색율(Blockage ratio, Btu)이라 정의하며 해당 식은 아래와 같이 표현함.

$$B_{tu} = \frac{A_{train}}{A_{tunnel}} \qquad (1)$$

- 폐색율의 정의에 의해 수치가 낮을수록 안전 권고치를 만족하는 터널 단면적이 커져야 함. 위 그래프에서 볼 수 있듯이, 동일한 운행속도일 경우, 터널연장이 2000 m 이내일 때 최소 터널 단면적이 높게 분포함. 터널연장이 2000 m 이상인 경우, 터널 단면적이 점차 줄어드는 것을 확인할 수 있음.
- 위 그래프에서 검토된 속도는 350 km/h 이상이며 350km/h일 때, 최소 폐색율은 0.278. 이때 열차단면적을 고려한 최소 터널단면적은 39.86㎡
- 본 장에서 검토되는 터널단면적(40 ㎡)과 열차속도가 250km/h임을 고려할 때 모든 터널연장에서 안전 권고치를 만족함.



<그림 2.4.1d UIC-779의 권고치>

(라) 승객 이명감 검토 결론

- 본 장에서 검토되는 터널단면적(40㎡)과 열차속도가 250km/h임을 고려할 때 모든 터널연장에서 안전 권고치를 만족함.

(2) 방재 측면에서의 검토

(가) 분석개요 및 조건

- 단선터널의 경우 복선터널과 비교하여 화재시 열기류 및 독성가스의 침강속도가 빠르게 발생하므로 열차내 탑승한 승객이 하차하여 화재열차로부터 안전하게 대피할 수 있도록 터널단면 계획을 수립하여야 함.
- 본 검토에서는 단선터널 단면적 축소에 따른 화재특성과 열차내 승객의 탑승밀도 및 대피로 특성에 따른 피난분석을 수행하여 단면적 변화에 따른 승객의 안전성을 비교함

○ 분석조건

- 분석에 적용한 터널단면, 승객수, 대피로 특성을 적용하여 화재분석의 경우 단선터널 단면별 3 Case, 피난분석의 경우 8 Case를 분석하였음.
- 국내기준 "철도터널의 화재안전성 분석방법 매뉴얼" 을 준용하여 신형전동차의 화재특성을 적용하였으며 피난 지연시간을 적용하여 승객의 피난분석을 수행하였음.

<표 2.4.7d 해석CASE>

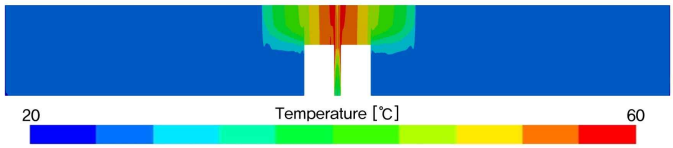
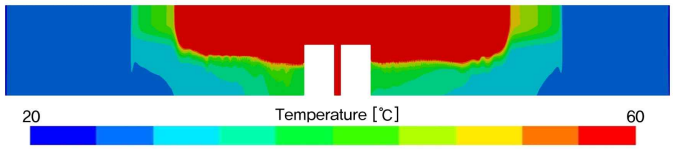
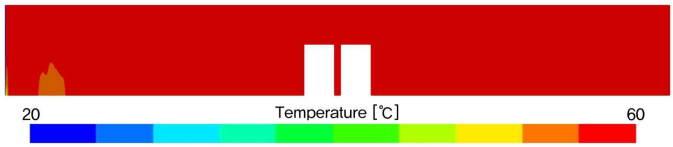
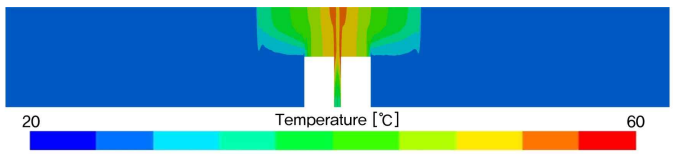
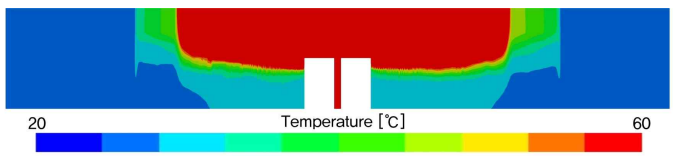
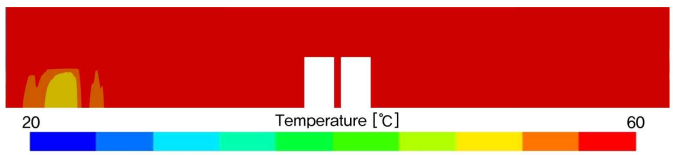
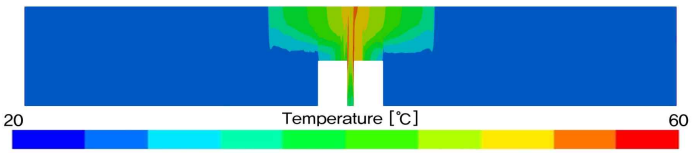
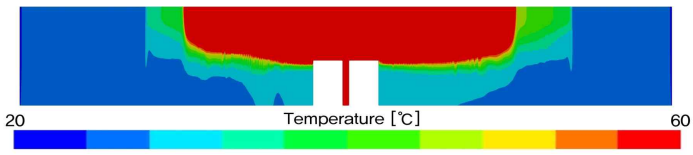
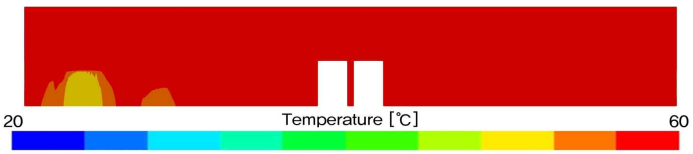
구분		적용조건	분석Case	
화재분석	터널단면	• 단선터널 : 40㎡. 45㎡, 50㎡ • 화재규모 20MW (신형전동차 기준)	3 Case	
대피분석	승객수	• 600명, 800명, 1000명, 1200명 • EMU열차 10량기준	4 Case	총 8 Case
	대피로	• 측방향, 양방향 (대피로 폭 : 0.9m) • 터널단면별 동일한 조건 적용	2 Case	

<표 2.4.8d 해석상세조건>

<table>
<tr><th>구분</th><th>내 용</th></tr>
<tr><td>화재특성</td><td>• 신형전동차 20MW화재 적용 : 철도터널의 화재안전성 분석방법 매뉴얼
• 900초에 Max HRR을 시작하며 최대화재 규모가 지속되는 조건을 적용함</td></tr>
<tr><td>피난특성</td><td>• 피난 지연시간 3분 30초
: "철도터널의 화재안전성 분석방법 매뉴얼-국토교통부" , "수서평택 기준 재정립(2014)-철도시설공단 "에서 제시한 열차 화재시 지연시간 적용</td></tr>
<tr><td>적용사항</td><td>• 2㎞ 터널(구배 +2‰)의 중앙부에서 열차화재가 발생한 것으로 분석함
• 호흡선 높이에서의 열기류 및 독성가스 농도를 분석하여 피난한계 시간을 분석함
<table>
<tr><th>구분</th><th>온도기준</th><th>독성가스</th></tr>
<tr><td>기준</td><td>60℃</td><td>CO : 1400ppm</td></tr>
<tr><td>출처</td><td colspan="2">• 국내 "소방시설 등의 성능위주설계 방법 및 기준-소방청 2017" 의 화재 및 피난시뮬레이션의 시나리오 작성기준(제4조 관련) 준용</td></tr>
</table>
• 승객의 피난은 피난시간이 가장 많이 소요되는 한방향으로 대피적용</td></tr>
</table>

(나) 화재분석결과

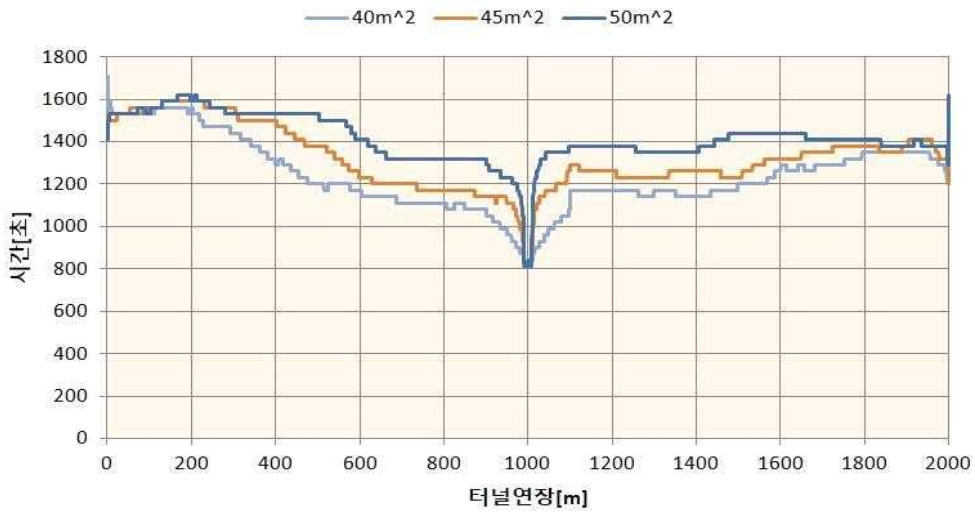
<표 2.4.9d 화재해석결과>

구분		분석결과
단면 40㎡	500초	
	1000초	
	1500초	
단면 45㎡	500초	
	1000초	
	1500초	
단면 50㎡	500초	
	1000초	
	1500초	

○ 침강시간 분석결과

- 터널연장별 호흡선 높이에서의 온도(60℃기준)에 도달하는 시간을 분석함.
- 터널단면 40m^{2}의 경우 열기류 침강속도가 45m^2 단면과 비교하여 최대 210초, 50m^2 단면과 비교하여 최대 390초가 빠른 것으로 볼 수 있음.

<표 2.4.10d 침강시간 분석결과>

구분	분석결과
온도 60℃ 도달시간	

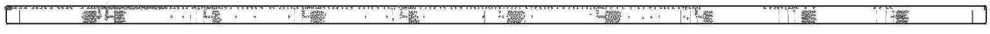
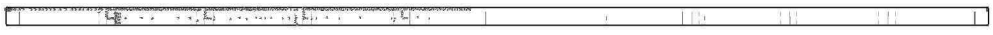
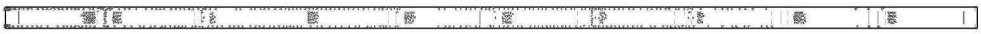
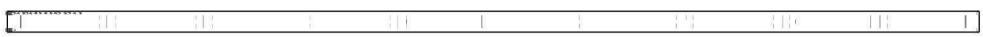
(다) 피난 분석 결과

- 열차에 탑승한 승객수와 대피로 특성(편측/양측대피)에 따른 열차구역 탈출시간을 분석함.

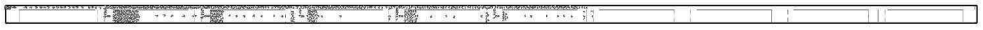
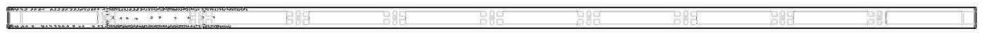


<그림 2.4.2d 피난해석 설정>

<표 2.4.11d 승객수 600명 적용시 피난 분석결과>

구분		분석결과
편측	300초	
	600초	
양측	300초	
	600초	

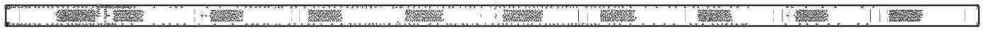
<표 2.4.12d 승객수 800명 적용시 피난분석결과>

구분		분석결과
편측	300초	
	600초	
	900초	
양측	300초	
	600초	

<표 2.4.13d 승객수 1000명 적용시 피난분석결과>

구분		분석결과
편측	300초	
	600초	
	900초	
	1200초	
양측	300초	
	600초	

<표 2.4.14d 승객수 1200명 적용시 피난분석결과>

구분		분석결과
편측	300초	
	600초	
	900초	
	1200초	
	1500초	
양측	300초	
	600초	
	900초	

<표 2.4.15d 피난시간 분석결과>

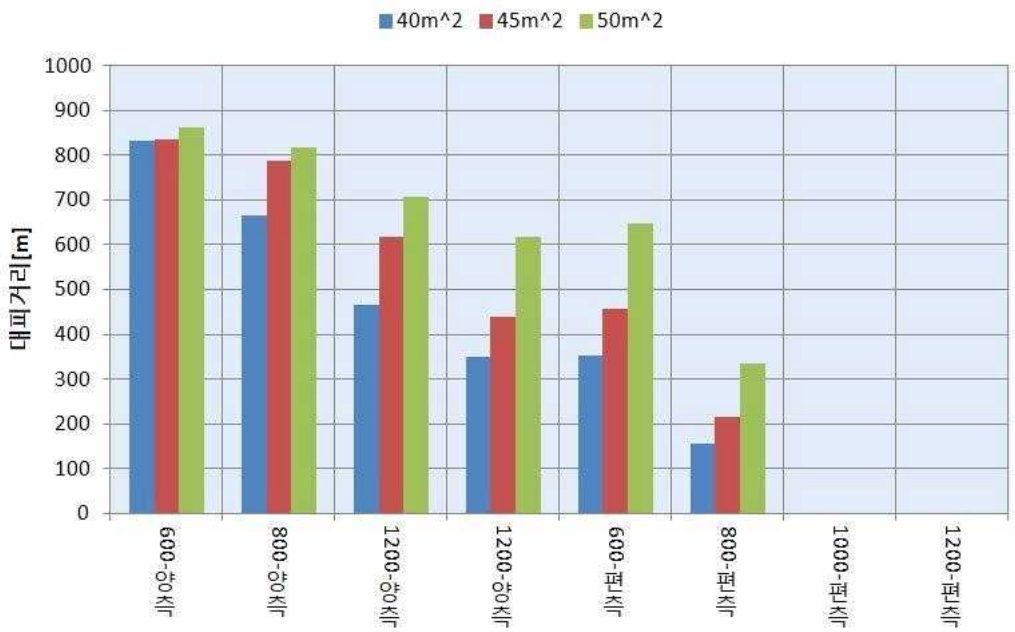
구분	피난시간 [초]							
	600명		800명		1000명		1200명	
	열차구역 탈출	터널 탈출	열차구역 탈출	터널 탈출	열차구역 탈출	터널 탈출	열차구역 탈출	터널 탈출
측면대피	893초	1793초	1115초	2015초	1414초	2314초	1567초	2467초
양측대피	619초	1519초	694초	1594초	804초	1704초	922초	1822초

- 열차에 탑승한 승객수와 열차하차시 대피특성(측면, 양측)에 따라 열차구역 탈출시간 차이가 발생하며 양측대피시 열차구역 탈출시간이 측면대피보다 31~41% 단축하는 것으로 분석됨.
- 탑승인원수 1200명 피난결과를 600명 승객대피와 비교한 결과 측면 대피시 75.5%, 양측대피시 48.9% 열차구역 탈출시간이 증가되는 것으로 분석됨.
- 터널내 화재사고에 따른 승객대피는 승객수와 대피로 특성이 승객의 안전성에 높은 영향을 주는 것으로 판단됨,

○ 피난 가능거리 분석결과

- 승객이 열차를 하차하여 터널 외부로 대피시 터널 지점별 열기류 침강시간에 따른 피난 가능거리를 분석하였음.

<표 2.4.16d 피난가능거리 결과비교>

구분	승객/대피로 특성에 따른 분석결과
피난 거리 결과	

<표 2.4.17d 대피방법에 따른 피난가능거리 결과 비교>

구분	피난거리 [m]							
	측면대피				양측대피			
	600명	800명	1000명	1200명	600명	800명	1000명	1200명
40㎡	352.0m	155.5m	-	-	831.5m	666.5m	466.5m	348.5m
45㎡	457.0m	215.5m	-	-	834.0m	786.5m	616.5m	438.5m
50㎡	647.5m	335.5m	-	-	861.5m	816.5m	706.5m	618.5m

- 승객과 대피로 조건에 따른 40m^2 피난 가능거리와 비교하는 경우 45m^2 단면은 최대 150m, 50m^{2}의 경우 최대 295.5m 피난 가능거리가 증대되는 것으로 분석되었음.
- 편측대피시 1000명 이상의 승객수에서는 피난이 불가능한 것으로 예상됨.

(라) 검토결과

- 터널단면 축소에 따른 화재시 열기류 침강속도는 터널단면 40m^{2}의 경우 열기류 침강속도가 45m^2 단면과 비교하여 최대 210초, 50㎡ 단면과 비교하여 최대 390초가 빠르게 나타나 단면축소에 따른 피난자의 위험성은 상대적으로 높게 분석됨.
- 철도터널의 경우 승객의 열차 탑승밀도 및 대피로 특성에 따라 열차하차 및 열차구역을 대피하는 시간 차이가 크게 발생하며 이는 철도 터널내 승객의 피난 안전성에 중요한 요소로 작용하는 것으로 판단됨.
- 단선터널 단면변화에 따른 승객의 피난 안전성을 분석한 결과 단면축소에 따른 피난 위험성은 증대되는 것으로 분석되었으나 분석에 적용된 승객수, 대피로 계획에 따른 피난시간 단축영향이 큰 것으로 예상됨.
- 단선터널 적용시 양측대피를 계획하는 경우 단면축소에 따른 피난거리 감소 영향이 적은 것으로 분석되어 대피 승객의 안전성에 큰 영향이 없는 것으로 판단됨. 또한, 터널내 제연설비가 계획되는 경우 단면 축소에 따른 승객의 피난 안전성 차이는 크지 않을 것으로 예상됨.
- 따라서, 단선터널의 터널단면 축소 계획시 열차운행특성에 따른 승객수, 터널내 대피로 계획, 방재시설(제연팬 등) 계획에 따른 승객이 안전성 검토를 통한 단면축소가 가능할 것으로 판단됨.
- 국내 관련기준도 1km이상의 철도터널에 대하여 화재안전성 분석을 통한 대피거리, 방재시설 계획을 하도록 하고 있으므로 관련기준에 따른 화재안전성 분석결과에 따른 터널단면 계획을 하는 것이 바람직할 것으로 판단됨.

2.5 실용화를 위한 연구성과 홍보

가. 홍보물 제작 및 배포

(1) 국문 팜프렛 제작 및 배포



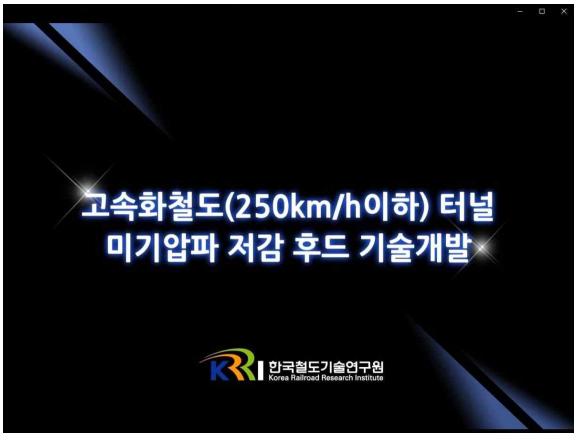


(2) 영문 팜프렛 제작 및 배포

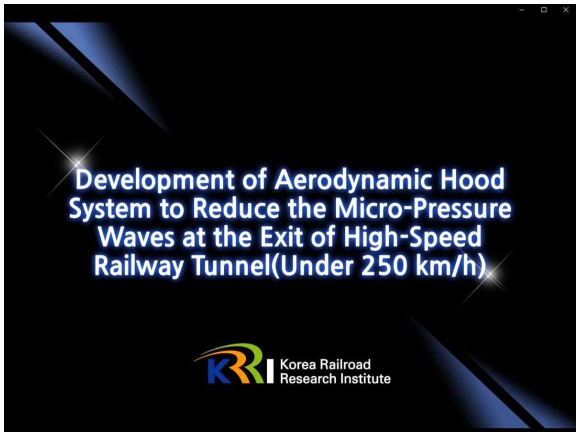




(3) 국문 및 영문 홍보 동영상 제작



(a) 국문 홍보 동영상(20분 분량)



(b) 영문 홍보 동영상(20분 분량)

<그림 2.5.1 기술개발 소개 홍보 동영상 제작 및 배포>

(4) 유튜브 홍보 동영상 업로드

○ 유튜브 홍보동영상(3분 분량) 주소 : https://www.youtubdcom/watch?v=euFn8eOsnDI



<그림 2.5.2 유튜브 홍보동영상(3분 분량)>

나. 기술박람회 홍보부스를 통한 연구성과 홍보

(1) 2018 국토교통기술대전 참가




<그림 2.5.3 2018 국토교통기술대전 기술홍보 참가 부스(코엑스 3층 D홀, 2018년6월7일~6월8일)>

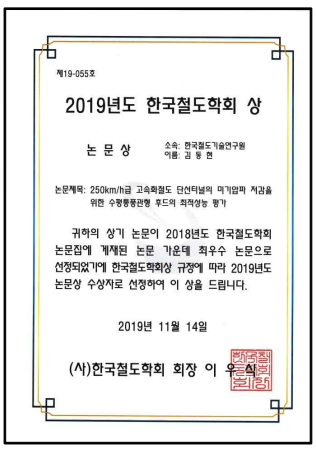
(2) 2018 독일 베를린 이노트랜스 국제철도박람회 참가




<그림 2.5.4 독일 InnoTrans 2018 기술홍보 철도연 참가부스(베를린, 2018년9월20일~9월21일)>

다. 포상을 통한 연구성과 홍보(2019~2020)

- 2019년도 한국철도학회 논문상 : 상어생체모사공학을 적용한 “고성능 터널 미기압파 저감 후드 개발” 논문에 대하여 최우수 논문으로 선정
- 2020년 “철도의 날” 국토교통부장관 표창 : 본 연구과제의 우수한 연구실적에 대하여 포상함.


제19-055호

2019년도 한국철도학회 상

논 문 상

소속: 한국철도기술연구원
이름: 김 동 현

논문제목: 250km/h급 고속화철도 단선터널의 미기압파 저감을 위한 수평등풍관형 후드의 최적성능 평가

귀하의 상기 논문이 2018년도 한국철도학회 논문집에 게재된 논문 가운데 최우수 논문으로 선정되었기에 한국철도학회상 규정에 따라 2019년도 논문상 수상자로 선정하여 이 상을 드립니다.

2019년 11월 14일

(사)한국철도학회 회장 이 우 석

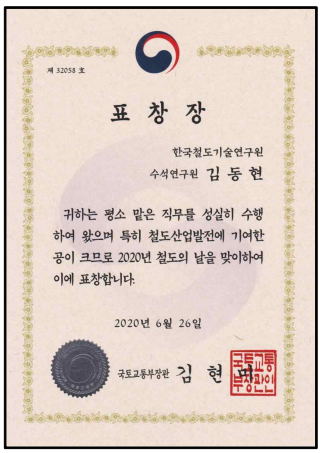

제 32058 호

표 창 장

한국철도기술연구원
수석연구원 김 동 현

귀하는 평소 맡은 직무를 성실히 수행하여 왔으며 특히 철도산업발전에 기여한 공이 크므로 2020년 철도의 날을 맞이하여 이에 표창합니다.

2020년 6월 26일

국토교통부장관 김 현

<그림 2.5.5 철도학회 최우수 논문상(좌)과 철도의날 우수연구성과 국토교통부장관 표창(우)>

2.6 연구실적

가. 논문 게재(2017.04~2020.06)

순번	제목	날짜	학회지	저자
1	Numerical analysis of impulse waves discharged at the exit of a model tunnel	2018.05	Journal of Mechanical Science and Technology	Guang Zhang, Dong Hyeon Kim, Heuy Dong Kim
2	Numerical studies on the radiation of train-tunnel impulse waves	2018.10	Tunnelling and Underground Space Technology	Guang Zhang, Dong Hyeon Kim, Heuy Dong Kim
3	Prediction of entry compression waves induced by a high-speed train entering tunnel	2018.11	Journal of Mechanical Science and Technology	Rohit Sankaran Iyer1, Dong Hyeon Kim, Heuy Dong Kim
4	Prediction of micro-pressure waves generated at the exit of a model train tunnel	2018.11	Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics	Guang Zhang, Tae Ho Kim, Dong Hyeon Kim, Heuy Dong Kim
5	퍼지 기법을 이용한 소음 저감 원천기술의 기술가치 산정에 관한 연구	2017.10	한국콘텐츠학회논문지	원유경, 김동진
6	배플 플레이트를 가지는 고속철도 터널 출구로부터 방사하는 미기압파에 관한 연구	2018.12	한국가시화정보학회지	김태호, 김동현, 김희동
7	슬라브궤도 터널로부터 방사되는 미기압파에 대한 수치해석	2019.03	대한기계학회	김태호, 김동현, 김희동
8	고속열차 진입속도가 터널 미기압파에 미치는 영향	2019.06	한국도시철도학회	김태호, 김동현, Iyer Sankaran Rohit, 김희동
9	고속철도 터널출구지형이 미기압파 방사특성에 미치는 영향	2019.09	한국도시철도학회	김태호, 김동현, Iyer Sankaran Rohit, 김희동
10	250km/h급 고속화철도 선터널의 미기압파 저감을 위한 수평통풍관형 후드의 최적 성능 평가	2018.10	한국철도학회 논문집	김동현, 서용철
11	고속열차의 터널진입시 발생하는 압력변화에 대한 수치해석적 연구	2018.12	한국도시철도 학회지	이호석, 김동현
12	터널 미기압파의 평가기준의 특성 비교	2019.10	한국기계기술학회지	김동현, 강부병
13	터널 미기압파 저감을 위한 터널 갱문확대 효과에 대한 수치 해석적 연구	2020.06	한국도시철도학회	이호석, 박기선, 홍기혁

나. 논문 발표(2017.04~2020.06)

순번	제목	날짜	학회지	저자
1	Study on Micro-Pressure Waves Discharged from the Exit of a Model Tunnel	2017.05	대한기계학회 2017년 춘계학술대회	Guang Zhang, Rohit Sankaran Iyer, Ying Zi Jin, Dong Hyeon Kim, Heuy Dong Kim
2	Study of the Entry Compression Waves Induced by a High-Speed Train at the Entrance of Tunnel	2017.05	대한기계학회 2017년 춘계학술대회	Rohit Sankaran Iyer, R Ajithkumar, Dong Hyun Kim, Heuy Dong Kim
3	Prediction of Impulse Waves Discharged from the Exit of a Model Tunnel	2017.11	대한기계학회 2017년 추계학술대회	Guang Zhang, Dong Hyeon Kim, Heuy Dong Kim
4	Prediction of the Entry Compression Waves Produced by a High-Speed Train Entering Tunnel	2017.11	대한기계학회 2017년 추계학술대회	Rohit Sankaranlyer, Dong Hyeon Kim and Heuy Dong Kim
5	터널출구에서 발생하는 미기압파의 방사입체각에 대한 연구	2017.11	대한기계학회 2017년 추계학술대회	김태호, Guang Zhang, 김희동
6	Prediction of the Entry Compression Waves Formed by a High-Speed Train Entering Tunnel	2017.12	Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow	Rohit Sankaranlyer, Dong Hyeon Kim, Heuy Dong Kim
7	The Characteristics of Weak Shock Waves Propagating through a Convergent Channel	2018.03.15	Asian Joint Conference on Propulsion and Power	Guang Zhang, Ke Xin Wu, Xiao Ping Chen, Ying Zi Jin, Heuy Dong Kim
8	고속 열차 터널의 지형조건이 미기압파에 미치는 영향	2018.04	대한기계학회 2018년 춘계학술대회	김태호, Rohit Sankaran Iyer, 김동현, 김희동
9	Computational Study on the Characteristics of Entry Compression Wave in Flared and Unflared Tunnels	2018.04	대한기계학회 2018년 춘계학술대회	Rohit Sankaran Iyer, Dong Hyeon Kim, Tae Ho Kim, Heuy Dong Kim
10	Experimental Study on the Entry Compression Wave in a Model Tunnel	2018.04	대한기계학회 2018년 춘계학술대회	Rohit Sankaran Iyer, Dong Hyeon Kim, Tae Ho Kim, Heuy Dong Kim
11	고속 열차 터널 모델의 압력파 측정에 관한 연구	2018.04	대한기계학회 2018년 춘계학술대회	Dong Hyeon Kim, Tae Ho Kim, Rohit Sankaran Iyer and Heuy Dong Kim
12	Study on the formation process of entry compression waves generated by a high-speed train entering tunnel	2018.06	AEROVEHICLES3	Rohit Sankaran Iyer, Dong Hyeon Kim, Tae Ho Kim, Heuy Dong Kim
13	Measurement of the pressure waves generated in a high-speed train-tunnel model	2018.07	ICEFM2018	Dong Hyeon Kim, Tae Hwan Ko, Tae Ho Kim and Heuy Dong Kim
14	INVESTIGATION OF THERADIATION SOLID ANGLE OF TRAIN-TUNNEL IMPULSE WAVES	2018.07	ICSV25	Dong Hyeon Kim, Tae Hwan Ko, Guang Zhang, Tae Ho Kim, Heuy Dong Kim
15	고속철도 터널출구 형상에 따른 미기압파 방사 특성에 관한 연구	2018.11	한국가시화정보학회 2018년 추계학술대회	김태호, 김희동
16	Effects of train nose and blockage ratio on the formation process of the entry compression wave in a high-speed railway tunnel	2018.12	대한기계학회 2018년 추계학술대회	Rohit Sankaran Iyer, Dong Hyeon Kim, Tae Ho Kim, Heuy Dong Kim

17	Measurement of the Impulse Wave Emitted from the Tunnel Exit Portals with Various Configurations	2018.12	대한기계학회 2018년 추계학술대회	Dong Hyeon Kim, Tae Ho Kim, Heuy Dong Kim
18	열차 속도가 터널 미기압파에 미치는 영향	2019.04	대한기계학회 2019년 춘계학술대회	김태호, Rohit Sankaran Iyer, 김동현, 김희동
19	Effect of Train Under-Gap on the Entry Compression Wave in a High-Speed Railway Tunnel	2019.04	대한기계학회 2019년 춘계학술대회	Rohit Sankaran Iyer, Dong Hyeon Kim, Tae Ho Kim, Heuy Dong Kim
20	Numerical Study of Impulse Wave Characteristics for a High Speed Train-Tunnel Exit Topography	2019.09	7th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow	Tae Ho Kim, Rohit Sankaran Iyer, Dong Hyeon Kim, Heuy Dong Kim
21	Effect of Train Nose on Formation of Entry Compression Wave in a High-speed Railway Tunnel	2019.09	7th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow	Rohit Sankaran Iyer, Dong Hyeon Kim, Tae Ho Kim, Heuy Dong Kim
22	Effect of Entrance Portal Inclination on the Formation of Entry Compression Wave in a High-Speed Railway Tunnel	2019.09	14th International Symposium on Numerical Analysis of Fluid Flows, Heat and Mass Transfer-Numerical Fluids	Rohit Sankaran Iyer, Tae Ho Kim, Dong Hyeon Kim, Heuy Dong Kim
23	Influence of train underbody gap on the formation of entry compression wave in a high-speed railway tunnel	2019.09	The 18th International Symposium on Aerodynamics, Ventilation and Fire in Tunnels	Rohit Sankaran Iyer, Dong Hyeon Kim, Tae Ho Kim, Heuy Dong Kim
24	Effect of Blockage on the Compression Wave Propagating along a High-Speed Railway Tunnel	2019.11	대한기계학회 2019년 추계학술대회	Rohit Sankaran Iyer, Dong Hyeon Kim, Tae Ho Kim, Heuy Dong Kim

다. S/W 등록(2017.04~2020.06)

순번	S/W 명칭	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명
1	터널출구 미기압파 역해석 S/W	19.12.20	한국철도기술연구원	2020.02.10	제C-2020-005624호	한국철도기술연구원
2	터널내 압력상승과 터널출구 미기압파 간이평가 S/W	19.10.22	한국철도기술연구원	2019.11.18	제C-2019-033812호	한국철도기술연구원
3	공기역학 실험 및 실측데이터 모니터링	20.01.10	㈜비엔텍아이엔씨	2020.01.14	제C-2020-003025호	(주)비엔텍아이엔씨
4	MP-Omega S/W	18.11.07	㈜비엔텍아이엔씨 한국철도기술연구원	2018.11.19	제C-2018-033319호	(주)비엔텍아이엔씨 한국철도기술연구원

라. 특허 출원 및 등록(2017.04~2020.06)

순번	특허 명칭	등록번호	등록일	출원인 (등록권리자)
1	고성능 단면 노즐을 활용한 터널 압력 상승 저감장치	제10-2119703호	2020.06.01	한국철도기술연구원
2	터널 미기압파 저감을 위한 공동구 구조체	제10-2087364호	2020.03.04	한국철도기술연구원
3	아가미 필라멘트 구조를 구비한 미기압파 저감 후드 구조체	제10-1900332호	2018.09.13	한국철도기술연구원
4	상어 생체모사형의 터널 미기압파 저감 후드 구조체	제10-1958759호	2019.03.11	한국철도기술연구원
5	출구용 터널 미기압파 저감 패널 구조체	제10-1958761호	2019.03.11	한국철도기술연구원
6	절곡 성형강판을 이용한 강성 빌트업 빔과 그 제작방법 및 빌트업 빔의 단부 보강 연결 시스템	제10-1858614호	2018.05.10	주식회사 에이맥스

마. 시작품 제작(2017.04~2020.06)

순번	시제품명	출시/제작일	제작업체명	설치장소	이용분야
1	풀-스케일의 터널 미기압파 저감 후드 구조체 시작품 (TEST-BED 에 설치)	2018.12.26	주식회사 에이맥스	오송철도종합시험선로 제5터널 시점 (소재지: 세종특별자치시 전동면 노장리)	철도터널
2	터널 미기압파 폭발음 주민 민감도 테스트 챔버	2019.12.30	한국철도 기술연구원	한국철도기술연구원 의왕시험동 (소재지: 경기도 의왕시 이동 40-6)	철도터널

바. 현장시험(2017.04~2020.06)

순번	현장시험명	시험일	시험장소	주요내용
1	후드 구조체 안정성 시험	20191212 (1차) 20200423 (2차) 20200521 (3차) (예비시험 3개월)	오송철도종합시험선로 시험 제5터널 시점	고속열차(KTX산천, 주행속도 최대 200㎞/h)의 후드 구조체 통과 시 변위 계측을 통해 변형률 1% 이내의 구조적 안정성을 검증함
2	상어 생체모사형 후드의 미기압파 저감성능 검증시험 및 터널 미기압파 DB구축	20181110 (1차) 20191212 (2차) 20200423 (3차) 20200521 (4차) (예비시험 3개월)	강릉선 장대터널에 대한 미기압파 현장시험 오송철도종합시험선로 시험 제2터널, 제5터널 내부 및 시/종점	풀-스케일의 고성능 상어 생체모사형 후드의 미기압파 저감성능 테스트-베드 검증시험 및 터널 단면적별(43㎡, 50.3㎡, 68.56㎡) 터널내 압력변동 및 미기압파 DB구축
3	터널 미기압파 폭발음 현장시험	20180924(1차) 20180925(2차)	스페인 발렌시아 La Cabrera Tunnel(7,252m)	스페인 발렌시아 고속철도 터널(53㎡)의 터널 미기압파 폭발음 현장계측

사. 설계기준(2017.04~2020.06)

순번	구 분 (설계기준/시방서/지침)	활용구분 (신규/개선)	설계기준/시방서/지침 명칭	반영일시	반영내용
1	터널 미기압파 관리기준(안) 및 절차서, 해설서	신규	설계기준	2020.12.01.(예정)	터널 미기압파 관리기준(안) 반영예정

아. 기술실시계약(2017.04~2020.06)

순번	계약명	실시기업명	계약 체결일	기술사용 시작일	기술사용 종료일	징수일자	징수금액 (천원)	계약 유형
1	고성능 터널 미기압파 저감 후드 기술	엠엠라이트 유한회사	2020.06.01	2020.06.01	2028.05.31	2020.08.31	19,200	착수 및 경상기술료
2	고성능 터널 미기압파 저감 후드 기술	(주)에이맥스	2020.06.01	2020.06.01	2028.05.31	2020.08.31	19,200	착수 및 경상기술료
3	고성능 터널 미기압파 저감 후드 기술	(주)효광 엔지니어링	2020.06.01	2020.06.01	2028.05.31	2020.08.31	19,200	착수 및 경상기술료
4	고성능 터널 미기압파 저감 후드 기술	(주)에이원 스페이스	2020.06.01	2020.06.01	2028.05.31	2020.08.31	19,200	착수 및 경상기술료
5	고성능 터널 미기압파 저감 후드 기술	(주)컨텍이앤씨	2020.06.01	2020.06.01	2028.05.31	2020.08.31	19,200	착수 및 경상기술료
6	고성능 터널 미기압파 저감 후드 기술	(주)홍지이앤씨	2020.06.01	2020.06.01	2028.05.31	2020.08.31	19,200	착수 및 경상기술료
착수기술료 합계							115,200	-

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

3.1 목표 달성도

가. 연구 목표

○ **연구목표** : 콘크리트궤도 적용, 터널단면적 축소, 열차의 고속화 추세에 따른 터널 미기압파에 효과적으로 대처 가능한 터널 미기압파 저감 후드 및 허용기준 개발

최종 성과목표	연구개발 내용
터널 미기압파 DB 구축	• 원강선, 오송종합시험선, 스페인 발렌시아 고속철도 터널에서의 공기역학 계측 현장시험 수행 • 국내/외 터널내 상세사양에 대한 방사 미기압파의 주파수특성 분석/평가 • 터널, 주변 민가 및 후드에 대한 계측, 모니터링 평가(오송 TEST-BED 현장시험) • 터널들 및 후드 구조체에 대한 중앙 모니터링 빅데이터 분석/처리
미기압파 시뮬레이션 역해석 S/W 개발	• 국내외 현장시험 데이터의 분석으로 미기압파 예측 경험식의 경험상수 평가 및 S/W 제작 기본설계 • 터널 출구갱문 형상에 따른 미기압파 3차원 방사패턴 분석 및 평가 • 터널입구후드의 CFD 해석기법 개발 • 독일 TEST-BED 현장시험 데이터 분석/적용으로 미기압파 CFD 역해석 성능평가 • 주변민가에 미치는 터널 미기압파 예측 상용화 역해석 S/W 개발 완료
국내 실정에 부합하는 미기압파 허용기준 마련	• 국내·외 허용기준, 기존/신규터널 미기압파 발생현황 조사 및 DB구축 • 터널 미기압파의 국내 철도환경 특성에 미치는 영향 분석/평가 • 고속화철도 터널 미기압파 허용기준의 신규(안), 절차서, 해설서 마련 • 관계부처와 터널 미기압파 허용기준(안) 및 절차서 자문/조정 및 협의
조건별 최적 후드 표준사양 개발 및 성능검증	• 초고속 터널주행 열차모델 시험장치에 1/60축척 후드 및 터널 모형 설계/제작, 후드 구조체 공기역학 최적설계 및 성능평가 • TEST-BED 현장시험 계측장치 및 장거리 중앙모니터링 사양 및 시스템설계 • TEST-BED 터널 현장시험 계측장치 구축 및 평가기술 개발 • 본선 TEST-BED 현장시험의 장거리 중앙 모니터링시스템 운영 및 계측 • 본선 TEST-BED 현장시험으로 풀-스케일 후드 구조체 시작품 성능평가 수행
미기압파 저감 후드 설치·시공법 개발	• 후드 구조체의 복합소재 조사 및 검토 • 2세대 후드의 기술가치 평가에 의한 경제성 분석 • 오송시험선 TEST-BED에 후드 기초 시공 및 갱문 안전성 검토 실시 • 실물 스케일 후드 구조체 시작품을 본선 TEST-BED에 구축 • 후드 구조체의 안정성 모니터링 계측시스템 구축 • 후드 구조체 안정성 향상 기술개발
연구성과 홍보	• 국토기술대전, 이노트랜스(InnoTrans) 철도 국제박람회 참여를 통한 기술성과 홍보 • 연구성과 홍보 브로슈어(국문, 영문), 홍보동영상(국문, 영문, 각각 20분 분량) 마련 및 홍보 유튜브 동영상(영문, 3분 분량) 제작하여 업로드 함

나. 당해년도 성과목표 달성도

질적성과목표(당해년도)					
성과목표	성과지표	검증방법	가중치	목표치	달성치
터널주행 열차모델 시험기에 의한 고효율 후드 최적설계	후드 구조체의 미기압파 저감 최적설계 방법 적합성	공인기관 시험성적서	1.2	미기압파 대역 1Hz까지 계측, 열차속도 270㎞/h까지 계측(주행시험기 성능)	달성
	열차속도, 터널단면적, 터널연장별 등 주요인자를 고려한 최적후드 표준사양 개발	공인기관 시험성적서	1.8	미기압파 저감성능 60% 이상	저감 성능 83.4%
TEST-BED 현장시험 DB 마련 및 후드 성능 검증	오송시험선 TEST-BED에서의 후드 구조체의 미기압파 저감성능	공인기관 시험성적서	2.4	미기압파 저감성능 60% 이상	저감 성능 84.0%
	오송시험선 단선터널들의 미기압파 영향 DB 구축	전문가 평가 (보고서)	1.4	저주파 계측한도 1Hz 이상 (오송시험선)	달성
미기압파 허용기준 마련	미기압파 허용기준(안) 및 해설서 최종안	기준안 /기준 해설서	1.4	허용 기준 50Pa 또는 115dB(C)	허용 기준 50Pa
	미기압파 예측 역해석 S/W 마련	SW 및 미기압파 예측보고서	1.6	10% 오차	데이터뱅크와 2% 오차
후드 구조체의 설계 및 공용중 시공기술 개발	교량상부 설치 후드 구조체의 구조해석/평가	구조검토서	0.6	구조체 설계강도 소요강도의 115% 이상 확보	달성
	교량상부 설치 후드 구조체 제작 매뉴얼	보고서	0.6	제작 및 조립 허용 오차 길이의 1%	달성
	교량상부 후드 설치 시의 공용중 시공 방법의 적합성	시공절차서 /보고서	0.6	공용중 시공기간 90일 이내	달성
TEST BED에 고효율 후드 제작/시공	교량상부 후드 설치 시의 철도시스템(궤도, 전기, 신호 등)과의 인터페이스 경합요건 검토	시공절차서 /보고서	0.4	인터페이스 경합에 대한 개선 건수 3건 이상	5건 달성
	공기역학 성능시험을 위한 후드 구조체 통풍관의 기능별 성능시험 부품 추가 제작 및 설치	제작완료 보고서	0.8	수평통풍관 개폐장치 개선사항 1건 이상	1건 달성

후드 구조체 시공안전성 모니터링 및 구조체 시험/평가	TEST-BED에 설치된 후드 구조체 안정성 모니터링(6개월 이상 계측 모니터링)	공인기관 시험성적서	1.0	변위측정 6개소 이상 후드구조체 변형율 1% 이내	1% 이내 달성
	공기역학 성능시험을 위한 후드 구조체와 터널 연결부 설치	설치 완료 보고서	0.6	후드 구조체 보완 1건 이상	달성
후드 구조체 안정성 향상 기술개발	단선터널 및 복선터널용 후드 구조체의 최적설계 도면작성	설계 도서 작성여부	1.6	후드구조체 재료비 5%이상 절감	달성
	후드 구조체 제작 및 운영 매뉴얼 최종안 작성	제작매뉴얼/ 전문가평가	0.6	후드 제작/시공비 기존대비 2/3 이하	달성
미기압파가 주변의 민가/기타 구조물에 미치는 영향 분석/평가	미기압파와 주변 구조물의 간섭현상에 대한 연구	전문가 평가 (보고서)	1.2	데이터샘플링 1kHz 이상, 주파수분석 1Hz 이상	달성
	터널 주변의 민가/구조물에서 발생하는 미기압파	전문가 평가 (보고서)	1.0	데이터샘플링 1kHz 이상	달성
본선 TEST-BED 터널 및 시험용 후드 구조체의 중앙 모니터링 S/W 작성 및 구축	모니터링 시스템 S/W의 신뢰도와 적정성	현장송출데이터와 저장데이터와의 비교보고서	1.2	100%(오류 0%)	달성
합 계			20		

양적성과목표(당해년도)				
구분	**증빙**	**가중치(%)**	**목표(건)**	**달성(건)**
국내외학술지게재	게재 논문	6	4	5
국내외학술회의발표	발표 논문	3	0	7
소프트웨어(S/W)	S/W 등록증	12	2	3
특허 출원	특허출원증	-	2	2
특허 등록	특허등록증	10	0	4
설계기준(안) 제안	기준(안) 및 절차서	10	1	1
시작품 제작	풀-스케일 시작품	6	1	1
현장시험	공인시험성적서	12	2	2
포상	상장	12	0	2
기술실시계약(기술료)	통상실시권 계약서	20	0	6
후드 도면집	3차원 도면집(27종)	6	1	1
후드 제작매뉴얼	후드 제작 메뉴얼	3	1	1
합 계		100		

다. 3년간 최종 성과목표 달성도

질적성과목표(2017년~2020년)				
성과목표	성과지표	검증방법	목표치	달성치
터널주행 열차모델 시험기에 의한 고효율 후드 최적설계	후드 구조체의 미기압파 저감 최적설계 방법 적합성	공인기관 시험성적서	미기압파 대역 1Hz까지 계측, 열차속도 270㎞/h까지 계측	달성
	열차속도, 터널단면적, 터널연장별 등 주요인자를 고려한 최적후드 표준사양 개발	공인기관 시험성적서	미기압파 저감성능 60% 이상	저감 성능 83.4%
TEST-BED 현장시험 DB 마련 및 후드 성능 검증	TEST-BED에서의 후드 구조체의 미기압파 저감성능	공인기관 시험성적서	미기압파 저감성능 60% 이상	저감 성능 84.0%
	터널들의 미기압파 영향 DB 구축	전문가 평가 (보고서)	저주파 계측한도 1Hz 이상 (강릉선,오송시험선:2건)	스페인포함 3건 달성
미기압파 허용기준 마련	미기압파 허용기준(안) 및 해설서 마련	기준안/ 기준 해설서	허용 기준 50Pa 또는 115dB(C)	허용 기준 50Pa
	미기압파 예측 역해석 S/W 마련	SW/미기압파 예측보고서	10% 오차	데이터뱅크와 2%오차
경제성평가	후드 구조체 적용 경제성 평가	전문가 평가 (보고서)	건설비 절감 5% 이상	최대 28% 달성
후드 구조체의 설계 및 공용중 시공기술 개발	후드 구조체의 구조해석/평가	구조 검토서	구조체 설계강도 소요강도 대비 10% 이상 확보	달성
	TEST-BED 후드 구조체 1차 제작 매뉴얼	보고서	제작 및 조립 허용 오차 길이의 1%	달성
	공용중 시공 방법의 적합성	시공절차서/ 보고서	공용중 시공기간 90일 이내	달성
TEST BED에 고효율 후드 제작/시공	철도시스템(궤도,전기,신호 등)의 인터페이스 경합요건 검토	시공절차서 /보고서	인터페이스 경합에 대한 개선 건수 3건 이상	달성
	후드 구조체의 시작품 제작 시공	제작사양서 /전문가평가	후드 제작/시공비 기존 대비 2/3 수준	달성
후드 구조체 시공안전성 모니터링 및 구조체 시험/평가	후드 구조체 시공 모니터링	평가 보고서	1일당 3시간이상 모니터링	달성
	TEST-BED 후드 구조체의 시험/평가	공인기관 시험성적서	구조체 설계기준 100% 만족 후드구조체 변형율 1% 이내	1% 이내 달성
후드 구조체 안정성 향상 기술개발	고속화철도용 최적설계 도면작성	설계도서 작성여부	후드구조체 재료비 5% 이상 절감	달성
	후드 구조체 운영 및 유지보수 매뉴얼 최종안 작성	운영 및 유지보수 매뉴얼/ 전문가평가	마감 판넬의 도색변화 없음 20년 이상	달성
터널 출구갱문 형상에 따른 미기압파의 3차원 방사패턴 분석/평가	터널 출구갱문형상에 따른 미기압파 방사 특성	전문가 평가 (보고서)	터널출구 입체각 360도까지 분석	달성
	터널 내부 특성에 따른 미기압파 방사 특성	전문가 평가 (보고서)	데이터샘플링 1kHz 이상 주파수분석 1Hz 이상	달성
	미기압파의 3차원 전파 특성 및 주파수 분석	전문가 평가 (보고서)	터널출구 입체각 360도까지 분석, 주파수분석 1Hz 이상	달성

국내 터널 상세사양에 따른 미기압파의 주파수특성 분석/평가	궤도 특성에 따른 미기압파 방사 특성	전문가 평가 (보고서)	데이터샘플링 1kHz 이상 주파수분석 1Hz 이상	달성
	슬라브 궤도 터널로부터 방사되는 미기압파의 주파수 분석	전문가 평가 (보고서)	데이터샘플링 1kHz 이상 주파수분석 1Hz 이상	달성
	밸러스트 궤도 터널에서 방사되는 미기압파	전문가 평가 (보고서)	슬라브궤도와 발라스트 궤도의 특성 임계값, 터널길이 제시	달성
미기압파가 주변의 민가/기타 구조물에 미치는 영향 분석/평가	미기압파와 주변 구조물의 간섭현상에 대한 연구	전문가 평가 (보고서)	데이터샘플링 1kHz 이상 주파수분석 1Hz 이상 저주파 대역 강도 제시	달성
	터널 주변의 민가/구조물에서 발생하는 미기압파	전문가 평가 (보고서)	민가 70dB(C)이하	달성
3D CFD해석에 의한 고효율 후드 구조체의 공기역학적 성능 평가기법 개발	3D CFD 해석방법의 적합성	시험데이터와의 비교보고서	실험치 대비 오차율 최대 15%	최대 6.41% (달성)
	단면별, 갱문형상별 후드의 성능 평가	시험데이터와의 비교보고서	실험치 대비 오차율 최대 15%	최대 12.3% (달성)
본선 TEST-BED 터널 및 시험용 후드 구조체의 중앙 모니터링 S/W 작성 및 구축	모니터링 시스템 S/W의 신뢰도와 적정성	현장 송출 데이터와 저장데이터와의 비교보고서	데이터일치도 100%	달성
본선 TEST-BED 및 신규노선 터널들의 사양, 사갱, 기재갱, 터널 주변민가 및 이격거리 도면화, 데이터베이스화	DB화된 도면의 적정성	현장사진 및 위성사진과의 비교검토	100%	달성

양적성과목표(2017년~2020년)				
구분	**증빙**	**가중치(%)**	**목표(건)**	**달성(건)**
국내외학술지게재	게재 논문	5	12 (국내등재지 12)	13 (SCI 4 + 국내등재지 9)
국내외학술회의발표	발표 논문	3	0	24
소프트웨어(S/W)	S/W 등록증	12	2	4
특허 출원	특허출원증	-	6	6
특허 등록	특허등록증	10	0	6
설계기준(안) 제안	기준(안) 및 절차서	10	1	1
시작품 제작	풀-스케일 시작품	7	1	2
현장시험	공인시험성적서	12	2	3
포상	상장	12	0	2
기술실시계약(기술료)	통상실시권 계약서	20	0	6
후드 도면집	3차원 도면집(27종)	5	1	1
후드 제작매뉴얼	후드 제작 메뉴얼	2	1	1
연구개발 관련 홍보	행사안내자료 등	2	0	2
합 계		100		

3.2 관련 분야 기여도

가. 철도터널 단면적 설계 기여도

○ 국내/외에서 산악이 많은 국가에서는 전체 철도건설비 때문에 터널 단면적을 최소 단면적으로 설계/건설하고 운영하고자 함. 이러한 터널 단면적 축소에서 가장 문제가 되는 터널 출구 미기압파 폭발음 문제를 경제적인 후드 대책으로 해결할 수 있게 되었음(고속열차 차량 내부의 승객 이명감 문제는 차체기밀도로 해결하는데 국내 국토부의 고속철도 차량설계기준은 차체기밀도 18 이상이라 터널단면적 40m^{2}에 대하여 승객 이명감 문제없음).

○ 250km/h급 단선터널 단면적별 건설비 절감률 분포

	단선터널 단면적				
터널 연장	40m^2	44m^2	47m^2	51m^2	56m^2
1km	Reference	8.75%	14.44%	20.97%	27.83%
3km	Reference	9.11%	14.94%	21.62%	28.64%
7km	Reference	9.23%	15.07%	21.85%	28.92%

- 상기 표에서와 같이 250km/h급 신규철도의 단선터널 단면적을 56m^{2}에서 40m^{2}로 축소하여 건설하게 되면 전체 터널 건설비를 약 28% 절감할 수 있음(현재 한국철도시설공단에서 터널건설비 절감 시행중임, 40m^{2}로 설계하고 시공하고 있음). 즉, 추후에 터널단면적을 확폭할 필요 없음.
- 참고로 250km/h급 단선터널 운행에 대하여, 스페인의 경우에는 터널단면적 53m^{2}를 적용하고 있고, 독일의 경우에는 터널단면적 60.5m^{2}을 적용하고 있음.

나. 터널 미기압파 폭발음 환경영향 평가 기여도

○ 소단면 터널의 신규철도를 설계할 때, 터널 미기압파 폭발음 환경영향평가가 필요함. 국내에서는 그동안 터널 미기압파 폭발음이 발생하는 철도 터널이 없어, 터널 미기압파 환경영향평가 전산해석 프로그램을 제작하는데 필수적인 각종 경험 매개변수(현장시험)를 결정하는데 어려움이 있었으나, 독일 DB(독일철도공사)와 공동으로 독일 현장시험으로 검증된 환경영향평가 전산해석 프로그램을 제작하였음.

다. 고속철도 차량의 전두부와 유효단면적 설계 기여도

○ 터널 미기압파 폭발음 저감을 위하여 일본이나 스페인 등에서는 터널 미기압파를 저감할 수 있는 차량 전두부 설계와 차량 유효단면적을 축소하고 있음. 이에 본 기술개발에

서는 고속열차 전두부 변형설계로 인한 공력저항 문제를 해소하는 대안을 제시하였음(그림 4.1.2 참조요망).

라. 철도터널 내부 사갱풍도 설계 기여도

○ 국내/외 철도는 차량 축중과 유지보수 문제로 발라스트 궤도에서 콘크리트 궤도로 변경하였고, 또한 철도의 고속화로 터널 미기압파 폭발음 문제가 대두되었음. 이에 터널 미기압파를 저감하기 위하여, 장대터널의 경우에는 터널 내부 사갱 상부에 별도의 풍도를 사갱 입구에서 출구까지 설치하는 경우가 있으나 비용적인 측면과 터널방재(화재)의 안전적인 측면에서 국외에서는 적용하지 않고 있음. 사갱 1개소당 미기압파 저감효과가 약 10% 정도라서 바람직하지 않음. 따라서 본 기술개발로 대체가 가능함.

마. 철도 운영계획 분야 기여도

○ 철도 운영계획(TPS 선도 등) 마련 시에, 터널 진입 시 감속이 없어지므로 열차 평균속도 상승, 소요시간 단축으로 고객 만족도 향상

○ 시간대별로 “주요 역 정차의 논스톱 운행” 가능하여 철도 서비스 품질 향상(사례 : SRT 고속철도, 서울 지하철 9호선)

- 터널 미기압파 저감 후드를 터널 입/출구에 설치하여, 주요 역 부근의 저속운행 터널에서도 고속운행이 가능함.

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

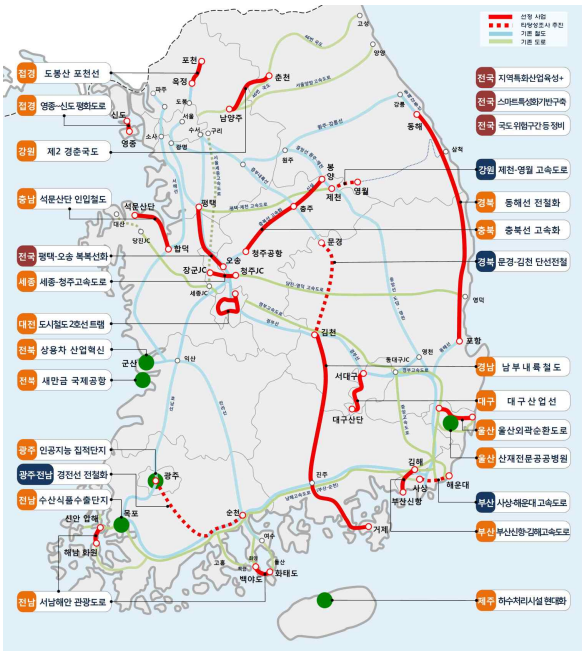
4.1 국내 고속화철도 건설사업에 활용

가. 기존선 고속화 개량계획에 활용

○ “국가균형발전 프로젝트 예비타당성조사 면제사업” 발표(기획재정부, ‘19.1.29)에 따른 기술지원 대책으로 활용 예정

- 국가재정법에 따라 국가균형발전 프로젝트 추진을 위한 예비타당성조사 면제대상 23개 사업을 국무회의에서 의결(’ 19.1.29)
- 기존철도 고속화사업들*이 예타 면제사업으로 선정됨에 따라, 기존선 터널단면적을 확폭하지 않고 최소한의 대책 적용으로 속도향상(120km/h → 250km/h) 추진 예정

* 충북선고속화(청주-제천, 1.5조원 88km), 동해선 단선전철화(포항~동해, 0.4조원, 179km)



<그림 4.1.1 국가균형발전 프로젝트 예비타당성조사 면제사업(기재부 2019.1.29. 발표)>

나. 신규 고속화철도 건설사업에 활용

○ VIP 말씀사항, 경제장관회의(2019.10.17.) : 경제 활성화를 위해 사회간접자본(SOC)을 비롯한 건설투자 확대를 강조. 이에 사업비 수조원의 광역 교통·물류망 구축 기반시설 투자에 속도가 붙을 전망(대상: 예비타당성 면제사업)

○ 남부내륙철도 건설사업*, 평택~오송 복복선화 건설사업*이 예타면제사업으로 선정되었고, 각각 운행속도는 250km/h와 350km/h로 발주되며 최소 터널 단면적으로 추진 계획되어

있으며 이에 대한 기술적 지원으로 활용

* 남부내륙철도(김천~거제, 4.7조원, 172km), 평택~오송 복복선화(평택~오송, 3.1조원, 46km)

○ 춘천-속초의 동서고속철도(93.7km, 2조2,840억원), 강릉-제진의 동해북부선(110.9km, 2조8,530억원)이 2021년 착공하여 2027년 개통을 목표로 추진 중에 있으며, 운행속도는 250km/h로 발주되며 단선터널들로 설계되며 최소 단면적으로 추진 계획되어있으며 이에 대한 기술적 지원으로 활용(2020년 7월, 한국철도시설공단에서 설계용역 공고됨)



<그림 4.1.2 연구개발 성과의 활용 절차>

다. 연구개발성과 활용 계획 상세

○ 고성능 터널 미기압파 저감 후드 기술이전

- 기존철도 고속화인 경우에, 기존터널 내공단면적을 확폭하지 않고 터널 갱구에 미기압파 저감 후드 설치로 철도터널 건설비 절감과 공기 단축
- 신규철도인 경우에, 터널 미기압파 저감 후드 적용 시 터널내공단면적 축소가 가능하여 철도터널 건설비 절감
- 예상 시장규모는 터널 189개소의 터널 입구/출구에 후드 263개소 설치 예상
- 중소기업 6개사와 “고성능 터널 미기압파 저감 후드”에 대한 통상실시권 기술이전 계약 완료(2020.06.01.)됨에 따라 기술보급이 활발히 진행될 것으로 예상됨.

□ 성과 적용가능 철도터널 현황

운행속도	신선	터널 내공단면적	터널 개소	후드 적용개소	예상 완공년도
250km/h	충북선 (청주-제천)	약 50㎡	50	60	`25
	중부내륙선 (여주-충주)	38.17㎡	5	6	`21
	동해선 (포항-삼척)	39.97㎡	37	59	`24
	경전선 (보성-임성리)	39.97㎡	19	30	`27
	중부내륙선 (충주-문경)	38.17㎡	12	24	`21 ~ `22
	동서고속철도 (춘천-속초)	38.62㎡	8	14	`26
300km/h (250km/h)	남부내륙선 (김천-거제)	57㎡ (40㎡)	58	70	`27
합 계			189	263	-

※ 터널 미기압파 저감 후드는 터널 완공 시 터널갱구(입구/출구)에 설치됨
※ 노선 조사근거 : 제3차 국가철도망 구축계획(2016-2025), 2016.06, 2019.01 국토교통부
※ 터널의 단면적, 터널개소는 각 사업의 설계도서를 근거로 함. 연장 600m 이상 터널에만 후드 적용
※ 남부내륙선은 터널단면적이 약 57m^{2}와 40m^{2}이고 단선터널 개소는 58개소, 운행속도는 300km/h(일부 250km/h)로 운행될 예정임

○ **터널 미기압파 환경영향평가 프로그램(S/W) 보급(고속화 철도의 소단면 터널용)**

- 신규철도와 기존철도 고속화 기본설계에서, 신뢰할 수 있는 터널 미기압파 환경영향평가 프로그램(S/W)의 부재로 혼란이 있었으나 독일 DBST와 공동으로 개발 완료한 프로그램을 보급할 예정

○ **터널 미기압파 관리기준(안) 신규 제정**

- 국내 철도환경에 맞는 터널 미기압파 관리기준(안) 및 절차서, 해설서를 마련하였으며, 국토교통부와 철도시설공단을 통하여 국토부 기준과 철도시설공단 KR Code에 신규로 반영할 예정임.

4.2 해외 고속철도 시장진출

가. 해외 고속철도 시장진출

○ 터널 미기압파 저감 대책기술로, 가장 경제적인 방법인 “고성능 터널 미기압파 저감 후드” 기술은 우리나라가 철도선진국인 일본과 독일보다 5년 이상 앞서 있음.

○ 본 기술개발을 통하여, 같은 성능에서 국내/외의 기존후드 구조체보다 후드 길이에서 약 1/3 크기로 짧아진 후드 구조체 상용화함(후드 구조체 제작 시공비 1/3~1/2 절감).

- 길이 27미터급 후드 구조체로 일본의 길이 72미터급 후드 구조체의 성능을 발휘함.

국 가	미기압파 저감 후드	미기압파 저감형 고속열차 전두부	미기압파 총 저감율	고속열차의 공력 저항
일 본			65% 저감	미기압파 저감형 전두부는 공력저항 약 4.5% 증가 (열차동력비용 약 4.5% 상승)
한 국		해당 없음	84% 저감	공력 저항 증가 없음

<그림 4.1.2 고성능 차세대 터널 미기압파 저감 후드 성능 비교>

- 세계 최고 수준인 일본 신칸센 미기압파 저감 후드보다 미기압파 저감 성능이 34% 더 뛰어나고, 시공성과 적용성이 우수한 한국형 미기압파 저감 후드의 원천기술 상용화 중임.



<그림 4.1.3 해외기술과 본 기술과의 차별성(미기압파 저감 성능)>

○ 오송종합시험선 테스트-베드에서의 후드 구조체 시작품 성능검증(2020년 5월, KTL 공인시험인증서)이 완료되었고, 2022년에 개통할 중부내륙선(여주-문경)의 설계변경에 반영중에 있으며, 이에 국내철도 운영노선에서 상용화 실적을 갖게 되면 해외 고속철도 시장진출에 매우 긍정적인 상황임(철도분야는 국내 상용화 실적이 없으면 해외 진출이 불가능함).

붙임. 참고문헌

1. “High-Speed Rail Aerodynamic Assessment and Mitigation Report,“ Federal Railroad Administration, U.S. Department of Transportation, U.S., 2015.
2. “DB Ril 853, Module 1002A01”, DB NetZe AG, Germany, 2013.
3. Hieke M., Gerbig C., Tielkes T., Degen K.G., “Assessment of micro-pressure wave emissions from high-speed railway tunnels”, Proceedings of the 9th World Congress of Railway Research, Lille, France, 2011.
4. Gerbig C., Hieke M., “Micro-pressure wave emissions from German high-speed railway tunnels - An approved method for prediction and acoustic assessment”. In. Nielsen et al.: Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems. Proceedings of the 11th International Workshop on Railway Noise, Uddevalla, Sweden, 9-13 September 2013. Springer Verlag Berlin, ISBN 978-3-662-44831-1, pp. 503-513, 2015.
5. Hieke M., Gerbig C., Van Diepen J., Tielkes T., Miyachi T., “Field measurements of Micro-pressure wave mitigations of German new high-speed line Erfurt-Halle/Leipzig”, Proceedings of the 11th World Congress of Railway Research, Milano, Italy, 2016.
6. Miyachi T., Hieke M., Gerbig C., Fukuda T., Tielkes T., “Acoustic modelling of micropressure waves emitted from high-speed railway tunnels with vented tunnel hoods”, Proceedings of the 11th International Symposium on Aerodynamics, Ventilation and Fire in Tunnels, Lyon, France, 13-15 September 2017.
7. Yamamoto A., “Micro-pressure wave radiated from a tunnel exit”, Preprint of the spring meeting of Physical Society of Japan, 4pH4, No. 4, pp. 91-96, Japan, 1977.
8. Ozawa S., “Investigation of pressure wave radiated from a tunnel exit”, Railway Technical Research Report, No. 1023, Japan, 1976.
9. 소음 · 진동관리법 제26조, 교통소음 · 진동의 관리기준, “소음진동관리법 시행규칙” [별표 12] <개정 2010.6.30.>
10. 소음 · 진동관리법 제20조, 생활소음 · 진동의 규제기준, “소음진동관리법 시행규칙” [별표 8] <개정 2010.6.30.>
11. “Sangaku tonneru sekkeihyoujun dou kaisetsu (Standard and manual for mountain tunnel design)”, Japan railway construction transport and technology agency(JRTT), pp. 119, Japan, 2008.
12. “Determinnation of railway tunnel cross-sectional areas on the basis of aerodynamic considerations”, 2nd edition, UIC code 779-11, February 2005.
13. “Micro-pressure wave investigtions on two high-speed trains for KRRI”, DBST, 2019.
14. “Micro-pressure wave investigtions for KRRI - Part II”, DBST, 2019.
15. “High-Speed Rail Aerodynamic Assessment and Mitigation Report,“ Federal Railroad Administration, U.S. Department of Transportation, 2015.

16. “Tunnel planen, bauen und instand halten, Modul 2001A01 Aerodynamische Einwirkungen Interoperable Strecken”, DB Ril 853.2001A01, Stand, Germany, 2011.
17. Schlämmer M., Hieke M., “CFD-simulations on the generation of the pressure wave when a high-speed train enters a tunnel with different portal modifications”, BBAA VI International Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics and Applications, Milano, Italy, 2008
18. Adami S., Kaltenbach H.-J., “Sensitivity of the wave-steepening in railway tunnels with respect to the friction model”, BBAA VI International Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics and Applications, Milano, Italy, 2008.
19. Hieke M., Gerbig C., Tielkes T., Degen K.G., “Assessment of micro-pressure wave emissions from high-speed railway tunnels”, Proceedings of the 9th World Congress of Railway Research, Lille, France, 2011.
20. “WP4 – T4.2 micro-pressure wave Output Document”, AeroTRAIN report, final and published version dated May, 2012.
21. Miyachi T., Hieke M., Gerbig C., Fukuda T., Tielkes T., “Acoustic modelling of micropressure waves emitted from high-speed railway tunnels with vented tunnel hoods”, Proceedings of the 11th International Symposium on Aerodynamics, Ventilation and Fire in Tunnels, Lyon, France, 13-15, September 2017.
22. Maeda T., “Review of micro-pressure wave radiating from tunnel portal and pressure variation under train passage”, RTRI report, 10-2, pp. 5-10, 1996.
23. Hara T., “Aerodynamic problems when train is running into tunnel with large velocity”, Railway Technical Research Report, NO. 153, 1-20, September, 1960.
24. 김동현, 서용철, “250km/h급 고속화철도 단선터널의 미기압파 저감을 위한 수평통풍관형 후드의 최적성능 평가,” 한국철도학회논문집, 21-9, pp 849-858, 2018.
25. 김상국, 정재웅, 김유일, 이윤희, 성태응, 박현우, “기술가치평가 사례 기반 현금흐름할인모형 감도분석 연구”, 한국기술혁신학회 2015년도 춘계학술대회, 2015.
26. 이영찬, 한관순, “기술가치 평가상의 기술기여도 산정에 관한 연구”, 한국 산업경영시스템학회, 춘계 학술대회 논문집, 2005.
27. 조차제, 박준현, 정일석, “경년 열화관련 기술의 가치평가를 위한 방법론 개발”, 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 2001.
28. 김정훈, “확률론적 시뮬레이션을 이용한 내륙수로 교통안전시설의 경제성분석-캄보디아의 프롬펜과 총크니아스항 구간을 대상으로”, 한국항만경제학회지, 5-4, 2009.
29. “09 R&D 분야 예비 타당성 조사 수행을 위한 지침연구-사업비용 추정 및 효과분석”, 한국과학기술기획평가원, 2010.
30. “기술가치평가 실무 가이드”, 산업통상자원부, 2014.
31. “기술가치평가 실무가이드”, 지식 경제부, 2011.
32. Amin S. H, Razmi J, Zhang G., “Supplier selection and order allocation based on fuzzy SWOT analysis and fuzzy linear programming”, Expert System with application, 38, pp. 334-342, 2011.

33. Bandarian. R., “Evaluation of commercial potential of a new technology at the early stage of development with fuzzy logic” , Journal of technology management & Innovation, Vol.2, Issue 4, 2007.
34. Lu Y., “A Case Study of the Chemical Supply Chain” , Supply Chain Risk Assessment Based on AHP and Fuzzy Comprehensive Assessment Mode, International Journal of u- and e- Servi ce, Science and Technology, Vol.8, No.2, 2015.
35. Erick P. M, Benitha M. M, “Evaluation of Road Traffic Accident Risk Based on Fuzzy Set The ory, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering” , Vol. 4, Issue 8, August 2014.
36. Shao M, Liang Q, Yan D, Qin. H, Xiang J, “Application of Fuzzy Comprehensive Evaluation on COGAG Power Plant of Performance” , Journal of Power and Energy Engineering, 2, pp. 29-34, 2014.
37. Rudinger G., “On the reflection of shock waves from an open end of a duct” , Journal of Applied Physics, 26, pp. 981-993, 1955.
38. Rudinger G., “The reflection of pressure waves of finite amplitude from an open end of a duct” , Journal of Fluid Mechanics, 3, pp. 48-66, 1957.
39. Kim H. D., Setoguchi T., Kashimura H. and Raghunathan R., “Augmentation of the magnitud e of the impulse wave discharging from a tube” , IMechE, Part C: Journal of Mechanical Eng ineering Science, 215, pp. 191-199, 2001.
40. Hieke M., Kaltenbach H. J., Tielkes T., “Prediction of Micro-Pressure Wave Emissions from High-Speed Railway Tunnels,” 13th International Symposium on Aerodynamics and Ventilatio n of Vehicle Tunnels, New Brunswick, New Jersey, pp. 487-499, 2009.
41. Kim H. D., Setoguchi T., “Study of the discharge of weak shocks from an open end of a duc t:, Journal of Sound and Vibration, 226, pp. 1011-1028, 1999.
42. Kim H. D., Kweon Y. H., Setoguchi T., Aoki T., “Weak shock reflection from an open end of a tube with baffle plate” , IMechE Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 21 7, pp. 651-659, 2003.
43. Ozawa S., “Studies of micro-pressure radiated from a tunnel exit,” , RTRI JNR 1121, 1979.
44. Ozawa S., Murata K., Maeda T. “Effect of ballasted tran on distortion of pressure wave in tunnel and emission of micro-presssure wave,” , Proceedings of the 9th International Sympos ium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, BHR Group, pp. 935-947, 1997.
45. Fukuda T., Ozwa S., Iida M., Takasaki T., Wakabayashi Y., “Distortion of compression wave propagating through very long tunnels with slab tracks,” JSMS International Journal, 49-1, p p. 1156-1164, 2006.
46. Kim H. D., “Wave Phenomenon in High-Speed Railway Tunnel,” , Transactions of the KSME B, 34-10, pp. 796-807, 1994.
47. Raghunathan R, Kim. H. D., Setoguchi T., “Aerodynamics of high-speed railway train,” Prog ress in Aerospace Science, 38, pp. 469-514, 2002.

48. Kim H. D., Kim T. H., Lee J. S., Kim D. H., “Characteristics of High-speed Railway Tunnel Entry Compression Wave,” , Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, B., 23, pp. 234-242, 1999.
49. Howe M. S., Iida. M., Fukuda T., Maeda A., “Theoretical and Experimental Investigation of th e Compression Wave Generated by a Train entering a Tunnel with a Flared Portal,” , Journa l of Fluid Mechanics, Cambridge University Press, 425, pp. 111-132, 2000.
50. Howe M. S., “On the Compression Wave Generated when a High-Speed Train Enters a Tunn el with a Flared Portal” , Journal of Fluids and Structures, Academic Press, 13, pp. 481-498, 1999.
51. Maeda T., Matsumura. T., Iida M., Nakatani K., Uchida K., “Effect of Shape of Train Nose on Compression Wave Generated by Train Entering Tunnel,” , Proceedings of International Conference on Speedup Technology for Railway and Maglev Vehicles, Society of Mechanical Engineers, 1993, pp. 315-319, Japan, 1993.
52. Iida M., Kikuchi K., Fukuda T., “Analysis and Experiment of Compression Wave Generated by Train Entering Tunnel Entrance Hood,” , JSME International Journal Series B, 49-3, pp. 761-770, 2006.
53. Iida M. and Howe M.S., “Compression Wave Generated by a High-speed Train Entering a Tu nnel Fitted with a Hood with a Long Slit Window,” , Journal of Low Frequency Noise, Vibrati on and Active Control, 26-4, pp. 227-247, 2007.
54. Xiang X., Xue L., Wang B., “Aerodynamic effects of inclined portals on the initial compressio n wave generated by a high-speed train entering a tunnel,” ASME Journal of Fluids Enginee ring, 137-12, pp. 121104, 2015.
55. Xiang X., Xue L. and Wang B., “Aerodynamic effects of unvented hoods on the initial compr ession wave generated by a high-speed train entering a tunnel,” ASME Journal of Fluids En gineering, 138-3, pp. 031102, 2016.
56. Miyachi T., Heike M., Gerbig C., Fukuda T., Tielkes T., “Acoustic modelling of micro-pressur e waves emitted from high-speed railway tunnels with vented tunnel hoods,” , ISAVFT17, pp. 80-91, 2017.
57. “Measures to ensure the technical compatibility of high-speed trains” , 2nd edition, UIC code 660, August 2002.

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 철도기술연구사업의 연구보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 철도기술연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

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