

# 고속철도용 터널 미기압파 저감 후드 실용화 기획연구 최종보고서

2015. 4. 20

주관연구기관 / 한국철도기술연구원  
위탁연구기관 / (주)비엔텍아이엔씨

국 토 교 통 부  
국토교통과학기술진흥원

# 제 출 문

국토교통부 장관 귀하

이 보고서를 “고속철도용 터널 미기압파 저감 후드 실용화 기획연구” 과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2015. 04. 20.

주관연구기관명 : 한국철도기술연구원  
주관연구책임자 : 김동현  
참여 연구원 : 고태환, 곽민호, 김정석,  
김정국, 안성권

위탁연구기관명 : (주)비엔텍아이엔씨  
위탁연구책임자 : 이호석  
연구원 : 홍기혁, 박민호

## 〈 보고서 요약서 〉

과제고유번호		해 당 단 계 연 구 기 간	2014. 10. 21 ~ 2015. 4. 20	단 계 구 분	(1) / (1)
연구사업명		국토교통연구기획사업			
연구과제명		고속철도용 터널 미기압파 저감 후드 실용화 기획연구			
연구책임자	김 동 현	해당단계 참 여 연구원수	총 : 9명 내부 : 9명 외부 : 명	해당단계 연 구 비	정부 : 50,000천원 계 : 50,000천원
		총연구기간 참 여 연구원수	총 : 9명 내부 : 9명 외부 : 명	해당단계 연 구 비	정부 : 50,000천원 계 : 50,000천원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	한국철도기술연구원 신교통연구본부		공동연구기관	-	
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위 탁 연 구	연구기관명 : (주)비엔텍아이엔씨		연구책임자 : 이호석		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서면수	
<p>○ 최근 국내 철도터널설계는 터널 내공 단면적을 축소하여 터널 건설비를 크게 절감하는 추세이며, 유지관리 효율성 등을 감안하여 콘크리트케도 공법을 적용하고 있으며 열차의 고속화 추세임. 이 때 나타나는 문제점인 터널 미기압파 환경 소음·진동 문제를 저렴한 대책으로 해결하는 것을 본 연구의 목표임</p> <p>○ 고속철도용 터널 미기압파 저감 대책 실용화 기술개발의 경제적 타당성 검토, 시작품 제작, Test-Bed 구축 및 시험평가, 시제품 보급에 필요한 핵심기술개발 기획을 다음과 같이 수행하였음</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 기술개발 동향 및 환경 분석, 기술개발 비전 및 목표 수립</li> <li>- 연구목표 달성을 위한 추진전략 및 추진체계 수립</li> <li>- 연구 수행을 위한 세부 과제 도출, 기술개발을 위한 로드맵 제시</li> <li>- 성과물에 대한 활용방안 및 실용화 추진방안 제시, Test-Bed 추진전략 제시</li> <li>- 소요예산 산정, 연구개발 사전타당성(정책적, 기술적, 경제적 타당성) 조사 수행</li> <li>- 과제공모를 위한 RFP 작성 및 평가기준 설정</li> </ul> <p>○ 기획 연구를 통해 다음과 같은 세부과제를 도출하였음</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· 준고속철도용 터널 미기압파 저감 대책 실용화 기술개발 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 250km/h급 고효율 후드의 실용화를 위한 통합설계 및 평가 기술개발</li> <li>- 250km/h급 고효율 후드의 공기역학적 성능평가 및 모니터링 기술개발</li> <li>- 국내 고속열차 차량 특성과 철도터널 주변 환경에 대한 미기압파 민감도 연구</li> <li>- 250km/h급 고효율 후드의 실용화 구조안정성 및 공용중 시공성 향상 기술개발</li> </ul> </li> </ul>					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	고속철도, 터널, 미기압파, 소닉 붐, 후드, 터널주행 열차모델 시험기, 현장시험, 건설비 저감			
	영 어	High Speed Railway, Tunnel, Micro Pressure Wave, Sonic Boom, Hood, Moving Model Test Rig, Field Test, Test Bed, Reduction of Construction Cost			

# 〈 요약 문 〉

## 1. 기획 연구의 목표

- 최근 국내 철도터널설계는 터널 내공 단면적을 축소하여 터널 건설비를 크게 절감하는 추세이며, 유지관리 효율성 등을 감안하여 콘크리트궤도 공법을 적용하고 있으며 열차의 고속화 추세임. 이 때 나타나는 문제점인 터널 미기압파 환경 소음·진동 문제를 저렴한 대책으로 실용화하는 핵심기술개발 기획

## 2. 기획 연구의 필요성



〈터널 출구에서의 미기압파 방사현상 및 민가의 환경피해(폭발음&진동)〉

- 고속열차가 터널에 진입할 때 압력파가 생성되어 터널의 끝을 향하여 음속으로 전파된다. 이러한 압력파의 일부분은 충격성 소음/진동의 형태로 터널 출구로부터 외부로 방사되는데 이를 미기압파(micro-pressure wave)라고 부르며, 터널 근처의 민가에서는 폭발음의 환경소음과 함께 심한 저주파 진동을 느끼게 됨.
- 경부/호남 고속철도는 터널 진입속도 대비 터널 내공단면적이 매우 크기 때문에 “터널 미기압파” 라는 폭발음 발생이 없으나,
- 최근 국·내외 터널 설계는 사업비 축소, 유지관리 효율성 등을 감안 콘크리트궤도 공법을 적용, 단면축소와 고속화 추세로 터널 미기압파 대책마련 시급
  - 일본, 독일, 중국 등 고속열차 운영국 들은 ‘08년 이후부터 미기압파 허용기준을 마련 건설단계부터 저감시설을 설계에 반영

구 분	경부고속	호남고속	중앙선	일본	독일	중국
터널단면적(m <sup>2</sup> )	107(복선)	96.7(복선)	66(복선) 40(단선)	63.4~66(복선)	62(단선)	48.6(단선)
운행속도(km/h)	300	300	250	245~260	250	200
허용기준	없음	없음	없음	있음	있음	있음
저감 시설 설치	없음	없음	없음	있음	있음	있음

※ (미기압파) 고속열차가 터널에 진입할 때 공기의 압축으로 압력파가 생성되어 터널의 끝을 향하여 음속으로 전파되어 터널 출구로부터 외부로 방사되어, 터널출구 외부의 민

가에 폭발음과 함께 심각한 진동을 일으킴  
 ※ (해외 허용기준) 일본 기준이 국제기준으로 적용 중이며, 터널 출구 20m 지점에서 50Pa 이하, 민가 근방(보안물건)에서 20Pa 이하

- “터널입구 미기압과 저감 후드” 는 최소 터널단면적과 콘크리트케도를 제일 먼저 적용한 일본 신칸센 철도에서 1975년 이후에 지속적으로 연구 개발하여, 현재 독일, 프랑스 등의 유럽과 중국 등은 일본에서 개발한 “창문형 후드” 를 사용하고 있음. 일본의 미기압과 저감 후드는 35년 동안의 연구개발 및 개량으로 지적 재산권 상에서 그동안 독점적 지위에 있었음.



<일본 신칸센의 미기압과 저감 후드>



<독일 ICE의 미기압과 저감 후드>



<프랑스의 미기압과 저감 후드>

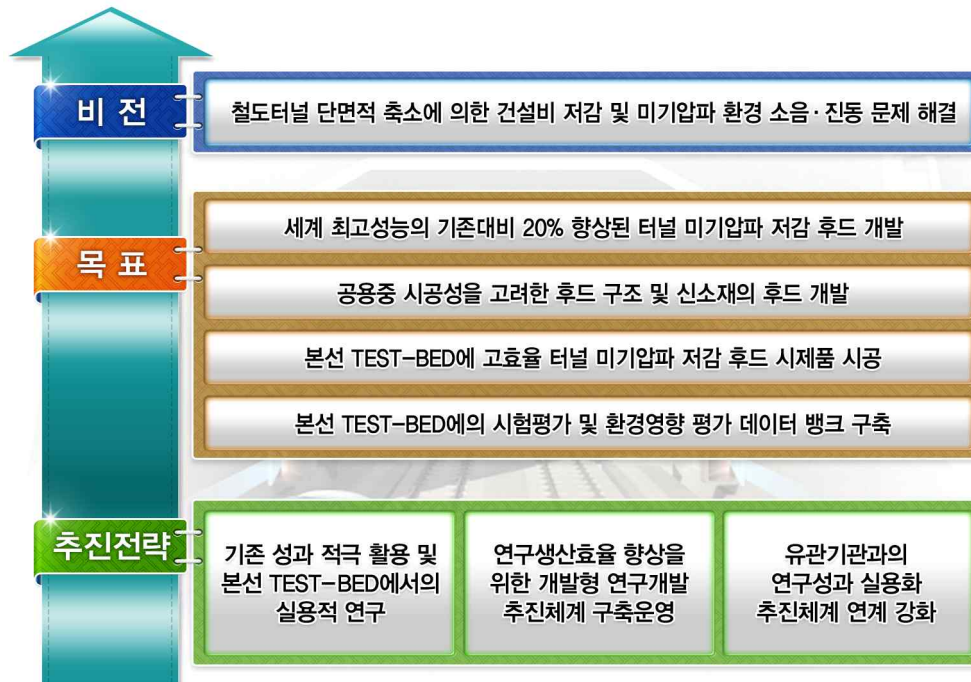


<중국의 미기압과 저감 후드>

- 운행속도 200km/h 이상의 고속철도에서 터널 미기압과 저감 후드 대책은 시공비가 저렴하며, 궁극적으로 최적설계의 터널 단면적에서 적용되기 때문에 최선의 터널 건설비 절감 방법임.
- 국내에 터널출구 미기압과 허용기준(규제치)이 없어 신뢰성 있는 환경영향평가 수행곤란
  - 현재 설계중인 100개소 이상의 터널이 콘크리트 케도 및 최소내공 단면적으로 계획되어 있어 미기압과에 따른 민원급증 예상
- 철도건설이 완공된 후에 저감대책을 적용할 경우 열차운행 안전성, 지장물 이설, 매몰비용 추가, 산악지형 조건 등으로 공사비 5~6배 증가

### 3. 기획 연구의 내용 및 범위

- 기술개발 동향 및 환경 분석
- 기술개발 비전 및 목표 수립
- 연구목표 달성을 위한 추진전략 및 추진체계 수립
- 연구 수행을 위한 세부 과제 도출
- 기술개발을 위한 로드맵 제시
- Test-Bed 추진전략 제시
- 성과물에 대한 활용방안 및 실용화 추진방안 제시
- 인력투입 계획 및 소요예산 산정
- 연구개발 사전타당성(정책적, 기술적, 경제적 타당성) 조사 수행
- 과제공모를 위한 RFP 작성 및 평가기준 설정



### 4. 세부 과제의 도출

- 철도터널 단면적 축소에 의한 건설비 저감 및 기존 고속철도 속도향상 시의 문제점인 민가에 미치는 터널 미기압파 환경 소음·진동 문제를 저렴한 대책으로 해결하기 위하여 다음과 같이 세부과제를 도출하였음.



○ 250km/h급 고효율 후드의 실용화를 위한 통합설계 및 평가 기술개발

- 국내외 현장시험 데이터의 분석으로 환경영향평가 경험식의 경험상수 평가
- 초고속 터널주행 열차모델 시험장치에 1/60축척 실험상 터널 및 후드 설계/제작, 실용화 성능평가
- 초고속 터널주행 열차모델 시험장치에 의한 TEST-BED 사양의 1/60축척 사갱 및 기재갱의 실용화 성능평가
- 차세대 고효율 후드의 경제성 평가에 의한 기술가치 평가
- 환경영향평가 경험식의 경험상수 평가에 대한 CFD해석 검증
- 주변민가에 미치는 터널 미기압과 환경영향평가의 상용화 S/W 개발
- 후드의 첨단소재 및 슬립화 구조 검토 및 적용성 평가
- 주변 환경과 어울리는 후드 스타일링 산업디자인 수행
- 적용소재에 안정성과 신뢰성이 검증된 후드 1차 시제품 제작(1/10축척~1/70축척)
- 본선 TEST-BED 시제품 현장시험의 장거리 모니터링시스템(성능평가) 구축
- 250km/h급 운행에서 터널 미기압과 허용기준의 지원 및 개정(안)
- 본선 TEST-BED에서 시제품의 시험평가 모니터링 수행 및 시험결과 분석

○ 250km/h급 고효율 후드의 공기역학적 성능평가 및 모니터링 기술개발

- 3D CFD 해석에 의한 고효율 후드 구조체의 공기역학적 성능평가기법 개발
- 본선 TEST-BED에서의 다목적 시험용 후드의 통풍관 개구부의 면적 원격제어 및 계측 인터페이스 설계 연구
- 본선 TEST-BED에서의 계측지그, 시그널 케이블링 배치, 콘트롤 박스 구성 및 인터페이스 설계(주관기관 중앙모니터링-빅데이터의 LTE급 무선전송 시스템)
- 본선 TEST-BED에의 다목적 시험용 후드의 주관기관 중앙 모니터링 S/W 작성 및 구축, 빅데이터 분석/처리
- 본선 Test-Bed 노선 터널들의 사양, 사갱, 기재갱, 터널 주변 민가 및 이격거리 도면

화, 데이터 베이스화

- 국내 고속열차 차량 특성과 철도터널 주변 환경에 대한 미기압과 민감도 연구
  - TEST-BED 노선의 터널 출구개문 형상에 따른 미기압과 3차원 방사패턴 분석연구
  - TEST-BED 노선의 터널 출구외부 지형환경에 따른 미기압과 3차원 방사패턴 연구
  - 국내 콘크리트 궤도 터널의 터널내 상세사양에 대한 방사 미기압과의 주파수 특성 연구
  - 250km/h급 국내외 고속열차와 터널 사양에 대한 방사 미기압과 크기의 비교 연구
  - 미기압과의 크기 및 FFT 분석에 따른 국내 민가분포 특성에 미치는 영향 평가
- 250km/h급 고효율 후드의 실용화 구조안정성 및 공용중 시공성 향상 기술개발
  - 운행 중인 철도노선에서의 터널입구 후드의 저비용 설치 소재/시공법 개발
  - 터널입구 후드의 교량설치 구조설계/시공 향상기술 개발
  - 후드의 첨단소재 검토 및 슬립화 구조 후드의 공진방지 및 내진성능 해석평가 및 시험평가 모니터링, 시험결과 분석
  - 본선 TEST-BED에서의 구조안정성 및 시공성 향상 기술 연구
  - 본선 TEST-BED 현장시험의 다목적 시험용 후드의 실시 설계도면 작성
  - 250km/h급 실용화를 위한 최적설계의 고효율 후드의 실시설계 도면 작성
  - 콘크리트 후드와 강구조 후드 등에 대한 안전기준 및 지침 마련

## < 목 차 >

<b>1장 연구과제의 개요</b> .....	<b>1</b>
1절 터널 미기압과 저감 대책 기술의 정의 .....	1
2절 기획연구의 배경 및 목적 .....	2
1. 기획연구의 배경 및 목적 .....	2
2. 터널 미기압과의 이론적 배경 .....	8
3절 기획연구의 범위 및 내용 .....	12
1. 연구범위 .....	12
2. 연구내용 .....	13
<b>2장 환경분석 및 대응전략</b> .....	<b>14</b>
1절 기술동향 분석 .....	14
1. 기술 분류 .....	14
2. 국내의 논문분석 .....	14
3. 국내의 특허분석 .....	33
4. 분석결과에 따른 시사점 .....	50
2절 국내외 시장현황 및 전망 .....	52
1. 국외 시장 환경 .....	52
2. 국내 시장현황 및 전망 .....	54
3. 해외 시장현황 및 전망 .....	58
4. 분석결과에 따른 시사점 .....	63
3절 국내외 정책동향 .....	64
1. 정책동향 .....	64
2. 국내의 관련법규 및 평가방법 동향 .....	67
3. 국내의 설계정책 동향 .....	75
4. 분석결과에 따른 시사점 .....	100
4절 연구개발 인프라 분석 .....	101
1. 터널 미기압과 관련 연구기관 현황 .....	101

2. 터널 미기압과 관련 R&D 인프라 현황 .....	102
3. 터널 미기압과 관련 전문가 현황 .....	105
<b>5절 국내외 기술수준 분석 .....</b>	<b>107</b>
1. 터널 미기압과 환경소음/진동 문제의 관심 .....	107
2. 신규 고속철도의 터널 미기압과 저감대책 방향 .....	107
3. 공기역학적 성능평가 도구에 대한 기술수준 .....	112
<b>6절 SWOT 분석 .....</b>	<b>120</b>
1. 내부역량 및 외부환경 .....	120
2. SWOT 분석 .....	122
3. 미래시장 대응전략 .....	124

### **3장 경제성 분석 및 사전타당성 검토 ..... 125**

<b>1절 경제성 분석 .....</b>	<b>125</b>
1. 경제성 분석 서언 .....	125
2. 철도터널 미기압과 저감용 차세대 후드 기술성 평가 .....	126
3. 미기압과 저감용 차세대 후드 경제성 평가 .....	149
4. 결론 및 향후 방향 .....	160
<b>2절 정책적 타당성 .....</b>	<b>162</b>
<b>3절 기술적 타당성 및 필요성 .....</b>	<b>165</b>
1. 기술개발 필요성 .....	165
2. 기술적 타당성 전문가 평가 .....	166
<b>4절 정부지원 타당성 .....</b>	<b>168</b>
1. 기술개발투자의 시의성, 시급성 .....	168
2. 국토부 주도의 개발 및 지원 필요성 .....	169
3. 정부 미지원시 문제점 .....	170

### **4장 연구개발과제 구성 및 추진전략 ..... 171**

<b>1절 비전 및 최종목표 .....</b>	<b>171</b>
1. 비전 및 최종목표 .....	171
2. 단계별 연구목표 및 내용 .....	173

<b>2절 추진전략</b> .....	<b>176</b>
1. 연구개발과제 구성 .....	176
2. 목표성과물 .....	177
3. 주요내용 및 추진전략 .....	178
4. Test-Bed 전략 .....	185
5. 연차별 기술로드맵 .....	195
6. 성과의 활용방안 .....	197
7. 연구수행체계 제안 .....	199
<b>3절 소요예산 산정</b> .....	<b>200</b>
<b>4절 기존연구와의 중복성 검토 및 연계방안</b> .....	<b>203</b>
<b>5절 기대효과</b> .....	<b>206</b>
1. 기획 연구결과의 활용방안 .....	206
2. 기대성과 .....	206
<b>5장 과제 제안요구서</b> .....	<b>207</b>
<b>1절 과제 제안요구서(RFP)</b> .....	<b>207</b>
1. 총괄(주관기관) 제안요구서(RFP) .....	207
2. 총괄 제안요구서(RFP)의 주요연구내용 분류 .....	211
<b>6장 참고문헌</b> .....	<b>216</b>

## 〈 표 목 차 〉

표 1.2.1 고속철도 보유 주요국가의 터널 미기압과 허용기준 및 저감 대책 현황	3
표 1.2.2 세계 각국의 고속열차 선두차량의 투영단면적 비교	7
표 2.1.1 기술분류	14
2.1.2 논문 분석 기준	14
표 2.1.3 논문 검색 조합식	15
표 2.1.4 주요 피인용 논문 현황	17
표 2.1.5 3년 內 발표논문 중 피인용수 높은 논문(Hot Paper) 현황	18
표 2.1.6 해석조건	25
표 2.1.7 해석조건	26
표 2.1.8 특허분석 기준	33
표 2.1.9 특허 검색 조합식	33
표 2.1.10 주요 핵심특허 현황 (피인용수 順)	41
표 2.1.11 주요 핵심특허 현황	42
표 2.2.1 2000년 세계 철도인프라 시장 규모	53
표 2.2.2 향후 세계 철도시장 전망 (통일)	53
표 2.3.1 고속철도 보유국의 터널 미기압과 관련 적용기준	68
표 2.3.2 철도설계기준 (2013. 12, 국토교통부)	68
표 2.3.3 터널설계기준(2007, 건설교통부)	69
표 2.3.4 KR C-12010, 터널계획 편(2012.12.5.)	69
표 2.3.5 KR C-12080, 갱구부 편(2013.9.16.)	70
표 2.3.6 국외의 터널 미기압과 허용기준 설계 적용사례	70
표 2.3.7 콘크리트궤도적용 터널의 폭발음 발생사례(1975년)와 비교로 분석/평가	75
표 2.3.8 상업운행으로 검증된 국외 설계사례에 의한 복선터널 사양 비교표	76
표 2.3.9 상업운행으로 검증된 국외사례에 의한 단선터널 사양 비교표	76
표 2.3.10 폭발음 발생 동영상 터널에 의한 미기압과 영향 비교표	77
표 2.4.1 철도터널 미기압과 평가 및 저감 대책 관련 연구기관	101
표 2.4.2 터널 미기압과 관련 해외기관 현황	102
표 2.4.3 터널 미기압과 관련 전문가 현황 및 활용 분야	105
표 2.4.4 터널 미기압과 관련 해외전문가 현황	105
표 2.5.1 철도 선진국의 터널 미기압과 환경영향 평가 방법	109
표 2.5.2 각국의 콘크리트궤도 터널에 대한 미기압과 저감대책 적용현황	110
표 2.5.3 250km/h급 고속철도에 대한 터널 미기압과 저감대책 적용현황	111
표 2.5.4 격자형태별 형상특성	115
표 2.5.4 국내에서 이용가능한 KISTI의 HPC	118
표 3.1.1 고속 열차 운영 국가들의 터널 미기압과 저감 대책 실행 현황	129

표 3.1.2 해외 철도 운영국가들의 후드 적용 현황 .....	133
표 3.1.3 터널 연장별 미기압과 허용 기준 초과 진입속도 비교 .....	137
표 3.1.4 터널 연장별 미기압과 허용 기준 초과 진입속도 비교 .....	137
표 3.1.5 차세대 후드 설치시의 저감 효과 비교(KTX-산천 열차 주행 시) .....	138
표 3.1.6 차세대 후드 설치시의 저감 효과 비교(EMU-250 열차 주행 시) .....	139
표 3.1.7 차세대 후드 설치시의 저감 효과 비교(KTX-산천 열차 주행 시) .....	140
표 3.1.8 차세대 후드 설치시의 저감 효과 비교(EMU-250 열차 주행 시) .....	141
표 3.1.9 차세대 후드 설치시의 저감 효과 비교(KTX-산천 열차 주행 시) .....	142
표 3.1.10 차세대 후드 설치시의 저감 효과 비교(EMU-250 열차 주행 시) .....	144
표 3.1.11 터널 미기압과 허용기준 만족 진입 속도 비교 .....	145
표 3.1.12 통풍관형 후드와 차세대 후드의 차이점 .....	146
표 3.1.13 철도 구축물 부설 현황 .....	147
표 3.1.14 비용편익 분석기법의 특징 비교 .....	151
표 3.1.15 경제성 평가 분석 기법별 특징 비교 .....	152
표 3.1.16 주요 고속 철도 선진국들의 터널 사양 및 미기압과 저감 대책 적용현황 ....	150
표 3.1.17 일본과 한국 터널의 미기압과 발생 현황 비교 .....	153
표 3.1.18 비교 대안단면적 별 건설비 절감액 비교 .....	155
표 3.1.19 독일 철도 터널단면적 대비 대안 단면적별 총 비용 및 절감액 비교 .....	156
표 3.1.20 터널 최소 단면적(40m <sup>2</sup> ) 적용 시 km 당 절감액의 가치 비교 .....	157
표 3.1.21 터널 단면적 별 건설비 절감액 비교 .....	158
표 3.2.1 철도사업 표준 공사비 .....	163
표 3.3.1 기술적 타당성 분석 평가 항목 .....	167
표 3.3.2 기술적 타당성 분석 전문가 평가 결과 .....	168
표 4.2.1 철도인프라 성능 및 건설비 최적화를 위한 기반기술 개발사업 성과지표(안)	182
표 4.2.2 단선터널과 복선터널의 단면 예시 .....	186
표 4.2.3 단선터널의 터널 미기압과 후드에 대한 예시 .....	187
표 4.2.4 일반음압계와 저주파 음압계의 특성 비교 .....	189
표 4.2.5 원주-강릉 터널 현황 .....	194
표 5.1.1 연구과제별 소요예산 .....	200
표 5.1.2 연구과제별 소요예산 총괄표 .....	202

## 〈 그림 목 차 〉

그림 1.1.1 터널 미기압과 방사 현상 .....	1
그림 1.2.1 터널 출구에서의 미기압과 방사현상 및 민가의 환경피해(폭발음&진동) .....	2
그림 1.2.2 일본 도후쿠, 홋카이도 신칸센의 미기압과 저감 후드 .....	4
그림 1.2.3 독일의 터널 미기압과 저감 후드 .....	4
그림 1.2.4 프랑스의 터널 미기압과 저감 후드 .....	5
그림 1.2.5 중국의 터널 미기압과 저감 후드 .....	5
그림 1.2.6 국외 고속철도에 설치된 터널 미기압과 저감 후드 비교 .....	6
그림 1.2.7 호남고속철도의 400km/h급 증속구간 우산터널(연장 320m)의 터널입구 후드 (2013년 8월30일 완공) .....	6
그림 1.2.8 한국형 “고성능 미기압과 저감 후드” 원천기술 .....	7
그림 1.2.9 세계 각국의 터널 미기압과 저감 후드 성능 비교표 .....	8
그림 1.2.10 터널에 열차 진입시 압축파 및 미기압파의 생성 .....	9
그림 1.2.11 터널입구에서 열차진입에 의해 생성된 압축파 전면형상 .....	9
그림 2.1.1 연도별 논문 발표 추이 및 주요 등재 저널 .....	16
그림 2.1.2 논문 발표 주요 국가 .....	16
그림 2.1.3 논문 발표 주요 저자 .....	16
그림 2.1.4 논문 발표 주요 연구기관 .....	17
그림 2.1.5 핵심논문 주요내용(1) .....	21
그림 2.1.6 핵심논문 주요내용(2) .....	23
그림 2.1.7 핵심논문 인용 분석(1) .....	24
그림 2.1.8 핵심논문 인용 분석(2) .....	24
그림 2.1.9 해석결과(1) .....	26
그림 2.1.10 해석결과(2) .....	27
그림 2.1.11 해석결과(3) .....	27
그림 2.1.12 분석방법 .....	28
그림 2.1.13 해석결과(4) .....	29
그림 2.1.14 해석결과(5) .....	30
그림 2.1.15 해석결과(6) .....	30
그림 2.1.16 해석모델링 .....	31
그림 2.1.17 해석결과(7) .....	32
그림 2.1.18 출원년도 및 국가별 출원추이 .....	34
그림 2.1.19 세부기술별 특허출원동향 .....	35
그림 2.1.20 주요 출원인 동향 .....	35
그림 2.1.21 주요 출원인 연도별 출원동향 .....	36
그림 2.1.22 기술별/국가별 기술분포(버블형) .....	37

그림 2.1.23	국가별 출원건수 및 시장확보지수 .....	38
그림 2.1.24	국가별 인용도 지수 .....	38
그림 2.1.25	국가별 영향력지수 및 기술력지수 .....	39
그림 2.1.26	특허 등고선 맵 .....	40
그림 2.1.27	세부기술별 특허 등고선 맵 .....	41
그림 2.1.28	핵심특허(US6216985B1) 평가결과 .....	45
그림 2.1.29	TDA Cross-Correlation Map .....	46
그림 2.1.30	TDA Aduna Map .....	47
그림 2.1.31	TDA Co-occurrence matrix (DWPI MANUAL CODES 비교) .....	48
그림 2.1.32	TDA Cross-correlation matrix .....	49
그림 2.2.1	국내 터널 현황 (철도산업정보센터 기술자료) .....	55
그림 2.2.2	전국 도로터널 현황 ( <a href="http://www.index.go.kr">http://www.index.go.kr</a> ) .....	55
그림 2.2.4	전국 철도터널 현황 ( <a href="http://www.molit.go.kr">http://www.molit.go.kr</a> ) .....	56
그림 2.2.5	호남 고속철도 터널 개소 대비 터널 연장 비교 .....	57
그림 2.2.6	연도별 준공터널 추이 .....	57
그림 2.2.7	2010~2020 글로벌 인프라 투자(지출) 현황 .....	58
그림 2.2.8	Rail Market : Forecast Overview of Key Rail Parameters, Global, 2013 and 2020 .....	59
그림 2.2.9	2010~2020 글로벌 인프라 투자(지출) 현황 .....	59
그림 2.2.10	2011~2020 고속철도 인프라 투자현황 .....	60
그림 2.2.11	2012~2020년 글로벌 고속철도망 인프라스트럭처 현황 .....	60
그림 2.2.12	미국 터널 및 교량 건설산업 시장규모 .....	61
그림 2.2.13	미국 고속도로 건설 정부예산 및 비주택분야 건설시장 규모 .....	61
그림 2.2.14	국외의 터널입구 미기압과 저감 후드 .....	62
그림 2.2.15	일본의 터널입구 미기압과 저감 후드 .....	63
그림 2.2.16	독일의 터널입구 미기압과 저감 후드 .....	63
그림 2.3.1	국가철도망계획(2011~2020) .....	66
그림 2.3.2	수송 분담 구조 변화(자료 : 국토해양부) .....	66
그림 2.3.3	데시벨과 음압의 관계와 소리의 크기 .....	72
그림 2.3.4	터널 미기압과 주파수 분석: 초저주파 성분 .....	72
그림 2.3.5	터널 미기압과 계측 위치 .....	73
그림 2.3.6	터널 미기압과 현장시험 사례(호남고속철도 회룡터널) .....	73
그림 2.3.7	터널 미기압과 환경영향평가 해석프로그램의 신뢰도 검증사례 .....	74
그림 2.3.8	대만 고속철도 터널입구 후드(2006년) .....	78
그림 2.3.9	중국 일반철도 송린바오(Songlinbao) 터널갱구의 미기압과 저감 후드 .....	78
그림 2.3.10	중국 양측 5개 창문형 후드(京滬高鐵西湯馬一號隧道) .....	78
그림 2.3.11	중국 상부 2개 창문형 후드 .....	79

그림 2.3.12 중국 상부 4개 창문형 후드 .....	79
그림 2.3.13 중국 단선병렬터널의 상부 통풍관형 후드 .....	79
그림 2.3.14 독일 Euerwang 터널의 남쪽 민가지역 .....	80
그림 2.3.15 독일 신선의 Euerwang 터널의 벨 마우스 갱문(남쪽 갱구)과 터널 갱구 부근 의 A9 도로(갱문으로부터 50m 거리임) .....	81
그림 2.3.16 독일 ICE3 노선을 위한 슬롯형 “터널 미기압과 저감 후드 “ (독일 DLR) .....	81
그림 2.3.17 독일 ICE3 노선을 위한 “터널 미기압과 저감 후드 “ 성능평가 열차 주행시 협기(독일 DLR) .....	81
그림 2.3.18 독일 Katzenberg Tunnel(연장 9.385 km)의 북쪽 갱구에 설치한 슬롯형 터널 미기압과 저감 후드 .....	82
그림 2.3.19 독일 Katzenberg Tunnel(연장 9.385 km)의 북쪽 갱구에 설치된 슬롯형 터널 미기압과 저감 후드(후드길이 50m) .....	82
그림 2.3.20 독일 Katzenberg Tunnel(연장 9.385 km)의 남쪽 갱구에 설치된 슬롯형 터널 미기압과 저감 후드 .....	83
그림 2.3.21 독일 Katzenberg Tunnel(연장 9.385 km)의 전체 개요도 .....	84
그림 2.3.22 설계속도 250km/h의 독일 Rastatt Tunnel(연장 4.270 km)의 갱구에 설치되는 슬롯형 터널 미기압과 저감 후드(단선병렬터널 내부 500m마다 횡갱 7개 설치, 2013년 착공함) .....	85
그림 2.3.23 독일 Rastatt Tunnel(연장 4.270 km)의 승객 탈출용 횡갱과 방재대책(터널내부 500m마다 횡갱 7개 설치, 2013년 착공함) .....	86
그림 2.3.24 독일 Osterberg Tunnel(연장 2.082 km)의 갱구에 설치된 슬롯형 터널 미기압과 저감 후드(터널내부 400m마다 횡갱 4개 설치됨, 2015년 개통예정) .....	86
그림 2.3.25 독일 Bibra Tunnel(연장 6.466 km)의 갱구에 설치된 슬롯형 터널 미기압과 저 감 후드(터널내부 500m마다 횡갱 13개 설치됨, 2015년 개통예정) .....	87
그림 2.3.26 독일 Fine Tunnel(연장 6.970 km)의 갱구에 설치된 슬롯형 터널 미기압과 저감 후드(터널내부 500m마다 횡갱 13개 설치됨, 2015년 개통예정) .....	87
그림 2.3.27 독일 Bleßberg Tunnel(연장 8.314 km, 외부연결 사갱 8개소)에 설치된 슬롯형 터널 미기압과 저감 후드(터널 내공단면적 92m <sup>2</sup> , 2017년 개통예정) .....	88
그림 2.3.28 독일 Silberberg Tunnel (연장 7.391 km, 외부연결 사갱 8개소)의 갱구에 설치된 슬 롯형 터널 미기압과 저감 후드(터널 내공적 92m <sup>2</sup> , 2017년 개통예정) .....	88
그림 2.3.29 Perthus 터널 갱구의 창문형 미기압과 저감 후드 상세모습 .....	89
그림 2.3.30 프랑스 미기압과 저감후드: 시계 방향으로 후드전면 경사각 모습, 후드 내부 에서의 창문 모습, 후드 시공모습 .....	89
그림 2.3.31 프랑스 Tartaignille 터널, Roque-Rousse 터널 등의 터널입구 후드 .....	86
그림 2.3.32 일본 산양 신칸센의 강재구조(데크 플레이트)의 터널입구 후드 .....	90
그림 2.3.33 일본 큐슈 신칸센 터널입구 후드(2011년): 콘크리트로 시공한 후드 .....	90
그림 2.3.34 일본 큐슈 신칸센의 창문형 후드 상세사양: 콘크리트 구조의 터널입구 후드 도면(치쿠시 터널에 설치, 창문형 후드) .....	91

그림 2.3.35	일본 큐슈 신칸센의 창문형 후드 위치도: 치쿠시 터널에 설치된 터널입구 후드 위치도(후드 길이: 24m) .....	92
그림 2.3.36	일본 큐슈 신칸센 치쿠시 터널의 터널 단면도(직선 복선터널) .....	92
그림 2.3.37	일본 동북 신칸센의 미기압과 저감용 터널입구 “창문형 후드”의 상세사진(1998년형으로 추정됨) .....	93
그림 2.3.38	일본 동북 신칸센의 제형 터널입구 후드의 상세(2009년형) .....	93
그림 2.3.39	일본 도후쿠 신칸센의 200m급 터널의 미기압과 저감대책 사례(후쿠오카현) .....	94
그림 2.3.40	일본 후쿠오카현 니혼마쓰 히라이시 부근 신칸센 터널(위성사진) .....	95
그림 2.3.41	일본 후쿠오카현 나카마시 부근의 신칸센 터널(위성사진) .....	95
그림 2.3.42	일본 산양 신칸센 오히라야마 터널(연장 6.64 km, 콘크리트 궤도)에 설치된 장대터널용 터널입구 후드(후드길이 49m) .....	96
그림 2.3.43	터널입구 후드의 효과 (후드길이 49m) .....	96
그림 2.3.44	일본 신칸센 터널에서 열차진입 속도에 따른 미기압과 최대값(현장시험 데이터, 터널출구중심으로부터 20 m 지점) .....	97
그림 2.3.45	호남고속철도 우산터널의 통풍관형 후드 .....	98
그림 2.3.46	터널 미기압과 측정 전경(회룡터널 출구 20m에서의 미기압과 계측) .....	98
그림 2.3.46	호남고속철도 회룡터널 시점의 계측시스템 배치도 .....	99
그림 2.3.47	열차진입속도에 따른 터널 출구에서의 미기압과 피크값(HEMU-430X, KTX-호남)] .....	99
그림 2.4.1	독일 DLR의 열차모델 주행시험기(최고속도 360km/h, 1:25 축척 시험기) ...	102
그림 2.4.2	영국 MU의 열차모델 주행시험기(최고속도 270km/h, 1:25 축척 시험기) : 프랑스 SNCF와 공동사용 시험설비 .....	103
그림 2.4.3	네덜란드 NLR의 열차모델 주행시험기(최고속도 300km/h, 1:170 축척 시험기) .....	103
그림 2.4.4	일본 철도종합연구소의 열차모델 주행시험기(최고속도420km/h, 1:60축척 시험기) .....	103
그림 2.4.5	중국 CSU의 열차모델 주행시험기(최고속도 400km/h, 1:18 축척 시험기) ...	104
그림 2.4.6	한국철도기술연구원의 열차모델 주행시험기(최고속도 1,060km/h, 1:61 축척시험기) .....	104
그림 2.5.1	STAR-CCM+해석결과 예시 .....	112
그림 2.5.2	STAR-CCM+해석결과 예시 .....	113
그림 2.5.3	유한체적법의 개념 .....	115
그림 2.5.4	Sliding Mesh의 개념 .....	116
그림 2.5.5	클러스터 시스템 개요 .....	117
그림 3.1.1	미기압과 저감용 통풍관형 후드 .....	127
그림 3.1.2	우산터널 미기압과 후드 적용 사례 .....	129
그림 3.1.3	일본 산양 신칸센의 터널 미기압과 저감 후드 .....	130

그림 3.1.4 독일의 터널에 사용되는 창문형 후드 .....	131
그림 3.1.5 프랑스의 터널에 사용되는 창문형 후드 .....	131
그림 3.1.6 중국의 터널에 사용되는 창문형 후드 .....	132
그림 3.1.7 대만 고속철도의 터널 미기압과 저감 후드 .....	133
그림 3.1.8 한국과 일본의 후드 성능 비교 .....	134
그림 3.1.9 후드 기술 간의 수준 격차 .....	135
그림 3.1.10 터널연장 1km 미만(터널출구 20m, KTX-산천) .....	138
그림 3.1.11 터널연장 1km 미만(터널출구 50m, KTX-산천) .....	138
그림 3.1.12 터널연장 1km 미만 (터널출구 20m, EMU-250) .....	139
그림 3.1.13 터널연장 1km 미만 (터널출구 50m, EMU-250) .....	140
그림 3.1.14 터널연장 3km(터널출구 20m, KTX-산천) .....	141
그림 3.1.15 터널연장 3km(터널출구 50m, KTX-산천) .....	141
그림 3.1.16 터널연장 3km(터널출구 20m, EMU-250) .....	142
그림 3.1.17 터널연장 3km(터널출구 50m, EMU-250) .....	142
그림 3.1.18 터널연장 7km(터널출구 20m, KTX-산천) .....	143
그림 3.1.19 터널연장 7km(터널출구 50m, KTX-산천) .....	143
그림 3.1.20 터널연장 7km(터널출구 20m, EMU-250) .....	144
그림 3.1.21 터널연장 7km(터널출구 50m, EMU-250) .....	144
그림 3.1.22 국내의 연도별 준공터널 추이 .....	148
그림 3.1.23 예정 터널입구 후드 적용대상 터널개소 .....	148
그림 3.1.24 단선 터널 단면적별 Km당 절감액 비교 .....	155
그림 3.1.25 단선 터널건설 km당 총 비용 및 절감액 비교 .....	156
그림 3.1.26 복선 터널 단면적별 km 당 절감액 비교 .....	157
그림 3.1.27 복선 터널 단면적별 총 절감액 비교 .....	158
그림 3.1.28 터널 미기압과 저감방법별 공사비 비교 .....	159
그림 3.2.1 철도인프라 분야별 건설비 비율 (호남고속철도) .....	164
그림 4.2.1 후드가 설치되지 않는 터널의 센서배치도 .....	187
그림 4.2.2 후드가 설치되는 터널의 센서배치도 .....	188
그림 4.2.3 차압 센서 .....	188
그림 4.2.4 절대압 센서 .....	188
그림 4.2.5 외부기상관측장치 .....	190
그림 4.2.6 센서 네트워크의 개념도 .....	191
그림 4.2.7 웹기반 모니터링 시스템의 예 .....	188
그림 4.2.8 원주-강릉 노선도 .....	194
그림 4.2.9 준고속철도용 터널 미기압과 저감 대책 실용화 기술개발사업 추진체계 ..	199

# 1장 연구과제의 개요

## 1절 터널 미기압파 저감 대책 기술의 정의



그림 1.1.1 터널 미기압파 방사 현상

- 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 매우 크게 증가됨.
- 터널 미기압파를 저감할 수 있는 기술로는 발라스트 궤도를 적용하는 기술, 터널에 수직갱이나 사갱을 적용하는 기술, 터널내 기재갱을 이용하는 기술, 고속열차 전두부를 미기압파 저감 형태로 적용하는 기술, 터널 입/출구에 미기압파 저감 후드(hood, 완충공)를 설치하는 기술 등이 있음.
- 열차 하중과 유지보수 문제로 궤도도상을 발라스트 궤도에서 콘크리트 궤도로 바꾸고 있는 추세이며, 궤도도상에 흡음블럭을 적용하는 문제는 설치비와 유지보수의 어려움이 있음. 터널내 수직갱, 사갱, 기재갱 등의 활용은 기존 토목시설물의 활용으로 한계가 있으며, 미기압파를 저감시키기 위하여 추가적인 수직갱이나 사갱 등의 설치는 비용적인 문제에 부딪히게 됨. 고속열차 전두부에 의한 미기압파 저감은 첫 번째 차량의 운송효율 문제로 전두부의 길이가 12m 내외로 한정되어 미기압파 저감효과가 최대 10%~15% 정도임.
- 비용적인 측면과 유지보수적인 측면에서 가장 효율적인 방법은 터널 갱문에 터널 미기

압과 저감 후드를 적용하는 기술로 알려져 있음[1,2].

## 2절 기획연구의 배경 및 목적

### 1. 기획연구의 배경 및 목적



그림 1.2.1 터널 출구에서의 미기압파 방사현상 및 민가의 환경피해(폭발음&진동)

- 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)라고 부르며, 터널 근처의 민가에서는 폭발음의 환경소음과 함께 심한 저주파 진동을 느끼게 됨.
- 경부/호남 고속철도는 터널 진입속도 대비 터널 내공단면적이 매우 크기 때문에 “터널 미기압파” 라는 폭발음 발생이 없으나,
- 최근 국·내외 터널 설계는 사업비 축소, 유지관리 효율성 등을 감안 200km/h급 이상 신선에도 콘크리트궤도 공법을 적용 단면축소와 고속화 추세로 터널 미기압파 대책마련 시급(국내 콘크리트 궤도적용 시작은 2005년임).
- 일본, 독일, 중국 등 고속열차 운영국 들은 ‘08년 이후부터 미기압파 허용기준을 마련 건설단계부터 저감시설을 설계에 반영
- 터널의 미기압파 발생은 다양한 변수를 가지고 있으며, 터널 설계 및 엔지니어링 단계에서 이용되는 수치해석기술로는 미기압파를 완벽하게 예측하는 것이 불가능한 실정임.
- 미기압파 발생에 대한 변수를 예측하기 위해서는 실제 운행중인 노선에 대하여 많은 횟수의 현장실측을 통하여 데이터를 축적하고 분석함으로써 발생경향 및 변수에 따르는 종속인자를 파악하는 것이 중요함.
- 이를 위하여 상시모니터링 시스템이 필요하며, 모니터링된 데이터를 활용하여 불완전한 해석기법을 보완하여 예측기술을 완성할 수 있음.
- 또한 운영 중인 터널에 후드를 설치하거나, 지형적으로 불리한 조건, 공사기간 등을 극

복하기 위해서는 후드 구조체의 설계 및 시공기술의 개발이 절실히 요구됨. 이러한 후드는 내진 및 내풍, 내구성에 대한 고려가 충분히 이루어져야 하나. 현재 국내에는 후드의 시공기술 관련 특허 등 관련 기초지식이 부족한 상태임.

- 따라서, 본 기획연구를 통하여 미기압과 저감예측기술 및 후드설계기술을 확보하기 위한 방향을 수립하여 시급성을 파악함으로써 연구방향을 도출하는 것이 필요함.

표 1.2.1 고속철도 보유 주요국가의 터널 미기압과 허용기준 및 저감 대책 현황

구 분	경부고속	호남고속	중앙선	일본	독일	중국
터널단면적(m <sup>2</sup> )	107(복선)	96.7(복선)	66(복선) 40(단선)	63.4~66(복선)	62(단선)	48.6(단선)
운행속도(km/h)	300	300	250	245~260	250	200
허용기준	없음	없음	없음	있음	있음	있음
미기압파 저감시설 설치	없음	없음	없음	있음	있음	있음

- “터널입구 미기압과 저감 후드”는 최소 터널단면적과 콘크리트궤도를 제일 먼저 적용한 일본 신칸센 철도에서 1975년 이후에 지속적으로 연구 개발하여, 현재 독일, 프랑스 등의 유럽과 중국 등은 일본에서 개발한 “창문형 후드”를 사용하고 있음. 일본의 미기압과 저감 후드는 35년 동안의 연구개발 및 개량으로 지적 재산권 상에서 그동안 독점적 지위에 있었음.
- “국민의 운택한 삶을 위해 터널 출구부근 민가의 폭발음과 같은 충격성 소음/진동 억제”가 중요함.



〈홋카이도 신칸센 터널입구 후드〉

〈조장대 터널(24km)의 후드〉



그림 1.2.2 일본 도후쿠, 홋카이도 신칸센의 미기압과 저감 후드



그림 1.2.3 독일의 터널 미기압과 저감 후드

- 독일은 2006년도의 Nuremberg-Ingolstadt 신선에서 콘크리트 궤도인 터널에서 미기압과 문제의 심각성을 인식하고, ICE 신선에 적용할 터널 미기압과 저감 후드를 개발 선정하기 시작하였음.



그림 1.2.4 프랑스의 터널 미기압과 저감 후드

- 프랑스와 스페인 국경에 위치한 Perthus 터널은 연장이 8.3km이고 2010년 12월에 상업운행을 시작하였음. Perthus 터널은 콘크리트 궤도를 적용한 단선병렬터널이고, 여객열차와 화물열차 혼용 노선임. Perthus 터널의 양쪽 갱구에는 “창문형의 미기압과 저감 후드” 를 각각 2개소씩 설치하였음. 프랑스는 국토의 대부분이 평야지대이지만 국경근처의 산악지대 철도터널에는 터널 내공단면적 최적화와 더불어, 터널출구 미기압과를 저감시키기 위하여 터널입구 후드를 적용하고 있음.



그림 1.2.5 중국의 터널 미기압과 저감 후드

- 중국의 최고속도 200km/h의 일반철도 신선에 설치된 터널 미기압과 저감 후드는 일본 신칸센의 창문형 후드를 설치하였음. 200km/h급 신선과 300km/h급 신선에 터널 미기압과 저감 후드를 광범위하게 적용하였음. 200km/h급 노선으로 터널입구 후드가 설치된 송린바오(Songlinbao) 터널은 단선터널(내공단면적 48m<sup>2</sup>)이며, 터널 진입속도가 160km/h임. 송린바오 터널 등이 있는 “수이유 고속철도(成渝高速铁路)” 는 200km/h급 노선이며, 우리나라 동해선, 중부내륙철도의 터널 내공단면적 40m<sup>2</sup>보다 큰 48m<sup>2</sup>로 설

계되어 상업 운행되고 있음. 즉, 우리나라 동해선, 중부내륙철도는 더 열악한 설계조건 이이기 때문에 터널 미기압과 저감 후드의 설치가 필요하지만 반영되지 않고 있음(환경 영향평가 결과도 설치필요).



그림 1.2.6 국외 고속철도에 설치된 터널 미기압과 저감 후드 비교

- 호남고속철도 400km/h급 증속구간인 우산터널 시점에 “한국형 터널 미기압과 저감 후드” 를 한국철도기술연구원에서 기술이전 설치완료 하였음(2013년 8월20일 완공).
- 1999년도에 철도기술연구원에서 원천기술 개발하여 국내특허 등록된 한국형 통풍관형 후드는 국내특허만 출원하여 기술수출이 불가능함.



그림 1.2.7 호남고속철도의 400km/h급 증속구간 우산터널(연장 320m)의 터널입구 후드(2013년 8월30일 완공)

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

표 1.2.2 세계 각국의 고속열차 선두차량의 투영단면적 비교

열차 종류	영업 최고속도	이층열차 여부	선두차량 투영 단면적(m <sup>2</sup> )	추진 방식
KTX	300km/h	Single Level	9.87	동력 집중식
KTX-산천	300km/h	Single Level	9.64 (동력차 후미 10)	동력 집중식
KTX-III (HEMU-430X)	370km/h	Single Level	11.87	동력 분산식
EMU-250(EMU-200)	250km/h	Single Level	11.48 ~ 11.87	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 ICE 3	330km/h	Single Level	10.40	동력 분산식
프랑스 AGV	360km/h	Single Level	10.50	동력 분산식

- 세계 각국 고속열차 선두차량의 투영단면적을 비교하여도 국내차량이 터널 미기압과 저감에 유리한 상황이 아님(터널단면적 대비 차량단면적 비율이 중요함).
- 한국철도기술연구원에서 “2013년 하반기 ~ 2014년 전반기”에 개발한 고효율 차세대 터널 미기압과 저감 원천기술 개발 결과물은 다음과 같은 연구목표로 개발되었음.
  - 원천기술의 250km/h급 신규 터널 미기압과 저감 후드 개발
  - 고속철도 터널 공기역학 엔지니어링 기술수출 목표
  - 표준형 후드 크기에서 미기압과 저감성능 65% 이상(세계 최고성능)

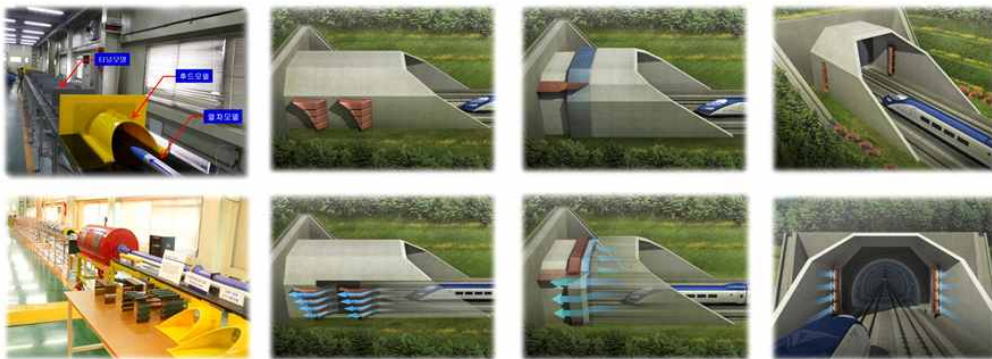


그림 1.2.8 한국형 “고성능 미기압과 저감 후드” 원천기술

○ 차세대 미기압과 저감 후드”의 성능 (2013 하반기 ~ 2014 전반기)

- 고효율 차세대 터널 미기압과 저감 원천기술 개발 완료



그림 1.2.9 세계 각국의 터널 미기압과 저감 후드 성능 비교표

- 작은 터널내공단면적과 콘크리트 슬라브 궤도에서 고속철도 운행의 가장 큰 장애요인 중에 하나인 터널 미기압과에 대한 실용화 대책기술 확보 연구기획
- 현재 설계중인 중앙선, 중부내륙철도, 동해선 철도건설과 건설중인 원주-강릉 신선 등의 터널 미기압과 충격성 소음/진동 환경문제를 해결하고자 함(100개소 이상)
- 기 수행된 원천기술 기초연구 “고성능 차세대 터널 미기압과 저감대책 원천기술 개발” (2014년)을 통해 개발된 한국형 신규 후드의 실용화 기술개발에 대한 기획
- 한국형 신규 후드인 “열차진행방향에 평행한 덕트를 포함하는 후드”, “아치형 슬릿 후드” “날개형 후드”의 3종 후드에 대하여 국내 기술력과 환경을 고려하여 실용화 기술개발 기획
- 고속철도 터널 미기압과 저감대책 적용으로 터널내공단면적을 작게 할 수 있으므로 철도터널 건설비 절감됨 ☞ 터널 내공단면적 20%이상 축소효과 → 터널 건설비 15% ~ 10% 절감

## 2. 터널 미기압과의 이론적 배경

- 열차가 고속으로 터널에 진입할 때 압축파가 열차 앞에 생성되고 터널을 통하여 전파된다. 터널 출구에서 압축파는 팽창파로서 터널 입구쪽으로 즉 뒤로 반사된다. 이 팽창파

는 열차 안에 있는 승객에게 귀울림현상(이명감, ear discomfort)을 야기한다. 동시에 미기압파라고 불리는 충격성(impulsive) 압축파는 터널출구 바깥 주변으로 방사되는데 이것은 환경 소음 및 진동문제를 야기한다. 이 현상은 주변민가에 급작스러운 폭발음과 민가의 문과 창문틀에 급작스러운 흔들림으로 나타난다[1].

○ 미기압파의 현상은 다음과 같이 3단계로 발생된다(그림 1.2.10 참조).

- 단계 (1) 열차의 터널 진입에 의한 압력파의 형성
- 단계 (2) 압력파의 터널내부에 전파와 함께 압력파형의 변형
- 단계 (3) 터널 출구로부터의 미기압파의 방사

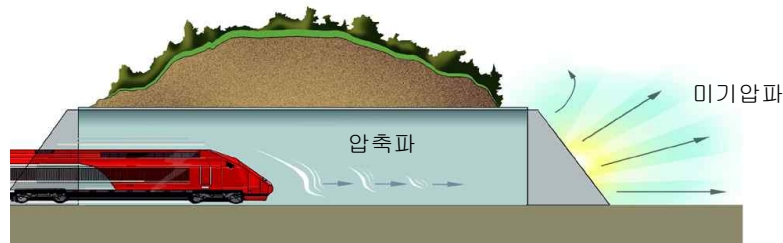


그림 1.2.10 터널에 열차 진입시 압축파 및 미기압파의 생성

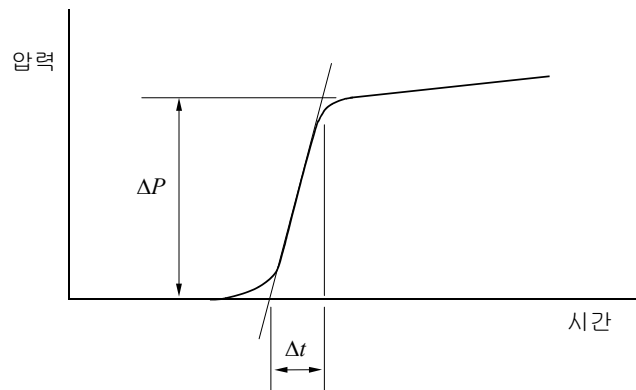


그림 1.2.11 터널입구에서 열차진입에 의해 생성된 압축파 전면형상

- 터널에 열차가 진입하면 터널 내에서는 압축파가 발생하는데 이 압축파의 시간에 대한 기울기(압력구배)가 가파르면 가파를수록 터널 출구에서 발생하는 미기압파의 강도는 크게된다(그림 1.2.11 참조). 이 압력구배를 낮출 수 있는 가장 효과적인 대책이 현재로서는 터널입구 후드 대책이다[2].
- 미기압파의 특성을 이해하기 위해서는 첫 번째로 단계 (3)을 이해하는 것이 용이하다. 그림 1.2.10에서와 같이 터널출구에서부터 방사되어진 터널 미기압파의 크기 P는 저주파

遠方場(far-field) 근사에 의해서, 터널 출구에 도달한 압축파의 파면의 압력변동(dp/dt)<sub>exit</sub>에 거의 비례하고, 갱구(터널출구)에서부터 거리  $r$ 에 반비례하며, 갱구의 지형 즉, 입체각  $\Omega$ 에 의존한다[2].

$$P(r, t) = \frac{2 A_s}{\Omega c r} \left[ \frac{dp}{dt} \right]_{exit} \quad (1)$$

여기서,  $A_s$  : 일본 신칸센 터널 단면적,  $c$  : 음속,  $p$  : 터널내 공기압력,  $t$  : 시간, [ ]는  $t - r/c$ 에서의 값을 나타낸다. 식 (1)를 이용하여 일본 신칸센 터널의 미기압과 최대값  $P_{MAX}$ 는 식 (2)로 표현된다.

$$P_{MAX} = \frac{2 A_s}{\Omega c r} \left( \frac{dp}{dt} \right)_{exit, MAX} \quad (2)$$

여기서,  $(dp/dt)_{exit, MAX}$ 는 터널출구에서 압축파 파면의 압력구배 최대값이다. 식 (2)는 첫째, 미기압과의 최대값은 터널출구에서 압축파 파면의 최대압력구배에 비례한다. 둘째, 미기압과의 최대값은 터널출구로부터의 거리에 반비례한다. 셋째, 미기압과의 최대값은 무지향 특성을 보인다. 터널 출구의 지형환경에 따라 입체각(solid angle)  $\Omega$ 는 달라진다. 일본 신칸센 터널에서는  $\Omega=2.3$ 을 사용한다.

○ 터널에 진입하는 열차에 의해서 발생하는 압력파의 파형은 열차 단면적, 터널 단면적, 열차 전두부의 형상, 터널입구의 형상, 열차속도에 의존된다. 단계 (1)에 대해서 터널입구에서 열차에 의해서 생성된 압력상승  $p$ 는 다음 식으로 표현될 수 있다[2].

$$p = \frac{1}{2} \rho \frac{1 - (1 - R)^2}{(1 - V/c) V/c + (1 - R)^2} \quad (3)$$

그리고, 압력상승  $\Delta P$ 에 대한 시간간격  $dt$ 는  $d/V$ 에 비례하는 것으로 간주한다(여기서  $d$ 는 터널의 수력직경). 따라서  $(dp/dt)_{ent, MAX}$ 는 식 (4)로 표현될 수 있다.

열차의 터널 진입시, 터널입구에 대한 압력과 파면의 최대 압력구배는 다음과 같다[2].

$$\left( \frac{dp}{dt} \right)_{ent, MAX} = \frac{1}{2} \rho \frac{V^3}{k d} \frac{1 - (1 - R)^2}{(1 - V/c) \{ V/c + (1 - R)^2 \}} \quad (4)$$

단  $V$  : 열차속도,  $R$  : 터널 단면적에 대한 열차 단면적의 비,  $k$  : 압력상승에 관한 매개변수,  $d$  : 터널의 수력직경(=  $4A/S$ ,  $S$  : 터널 원주길이),  $r$  : 공기의 밀도이다. 여기서  $k$ 는 열차 전두부의 형상과 터널입구에 의존하는 압력상승에 대한 시간간격을 나타내는 매개변수이다. 이 값은 현차시험이나 모형실험, 컴퓨터 시뮬레이션으로 구한다.

식 (4)는 단순화된 방정식이지만 터널에 대한 열차의 단면적 비율의 영향과 터널에 들어가는 열차의 속도향상을 설정하는데 유용하다. 터널입구 가까이에서 열차에 의해 생성된 압축과 압력구배는 모형실험이나 컴퓨터 시뮬레이션으로 상세하게 구한다. 압축파의 생성은 1차원 현상으로 간주되므로 축대칭 열차모델에 의한 모형실험, 컴퓨터 시뮬레이션은 유용하다.

○ 단계 (2)에 대해서, 터널에서 압축파의 파면은 전파하는 동안에 변형된다. 터널이 짧은 경우에는, 터널내를 전파하는 압축파는 변형이 거의 없기 때문에, 터널출구에서의 최대 압력 구배( $(dp/dt)_{exit}$ )는 다음과 같다.

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{exit} = \left(\frac{dp}{dt}\right)_{ent} \quad (5)$$

장대 터널의 경우에는 궤도종류에 따라서 영향을 받기 때문에, 발라스트궤도의 경우에는 식 (5)가 식 (6)과 같이 되어, 미기압과  $P$ 는 짧은 터널에 비해서 작아진다.

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{exit} < \left(\frac{dp}{dt}\right)_{ent} \quad (6)$$

장대터널의 슬라브 궤도의 경우에는 식 (7)과 같으며, 미기압과  $P$ 는 짧은 터널에 비해서 커진다.

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{exit} > \left(\frac{dp}{dt}\right)_{ent} \quad (7)$$

열차의 터널 진입에서 초기의 최대 압력구배는 터널에 들어가는 열차의 각각의 속도에 의존한다.

(1) 짧은 터널(예: 길이 1.5 km이하)에서는, 미기압과의 최대치와 열차속도의 관계가  $V^3$ 에

비례한다.

- (2) 장대 터널에서는 슬라브케도에 의해 파면의 앞쪽 면이 수직이 되기 때문에 미기압과가 상당히 커진다.

### 3절 기획연구의 범위 및 내용

#### 1. 연구범위

- 기획연구의 범위는 원천기술 기초연구 “고성능 차세대 터널 미기압과 저감대책 원천기술 개발” (2014년)를 통해 개발된 한국형 신규 후드의 실용화 기술개발에 대한 기획이며, 한국형 신규 후드는 “열차진행방향에 평행한 덕트를 포함하는 후드”, “아치형 슬릿 후드” “날개형 후드”의 3종 후드에 대하여 국내 기술력과 환경을 고려하여 실용화 기술 개발 기획을 하고자 함.
- 터널 미기압과 저감 후드의 원천기술 실용화 기술개발 기획
  - 일본, 독일, 프랑스 등 선진국의 향후 기술동향 조사 및 분석
  - 터널 미기압과 저감대책이 터널 건설비 건전화에 미치는 경제성 평가
  - 고효율 후드의 공기역학적 성능평가기법
  - 터널 미기압과 환경영향평가의 상용화 S/W
  - 실용화를 위한 터널주행 열차모델 주행시험에 의한 최적설계
  - 국내외 현장시험 데이터 분석 및 경험상수 도출
  - 3차원 전산유체 해석기법을 이용한 고효율 후드구조체의 공기역학적 성능평가방법 개발을 위한 기획
  - 국내 철도터널 갱문형식 및 외부 지형환경에 대한 미기압과 민감도 분석/평가
  - 고속철도 운행에서 터널 미기압과 관련 법제도 및 하위규정의 개선사항 도출 및 법제화 방안 마련
- 친환경 고효율 터널 미기압과 저감 후드 구조설계/시공 기술 기획
  - 콘크리트 후드와 강구조 후드의 구조적 안정성 평가
  - 터널입구 후드의 교량 설치 구조설계 향상기술
  - 주변 환경과 어울리는 후드 스타일링 산업디자인 적용 및 평가
  - 후드 구조의 열차주행 진동 및 내진성능 평가
  - 건설비 효율화를 위한 저비용 설계/시공기술
  - 운행중인 철도노선에서의 후드의 저비용 설치방법
- 개발기술의 성능과 안정성 확보를 위한 실증시험 기획
  - 본선 시험부설 TEST-BED 구축 방안

- 본선 TEST-BED에 원격 모니터링 시스템 설계 및 구축
- 시작품 제작시공(현장 시험부설) 및 현장시험 시험평가 방안제시
- 본선 TEST-BED 현장시험 수행 및 Big Data 처리 및 분석
- 환경영향평가를 위한 현장시험 데이터뱅크 구축 및 평가 S/W에 피드백

## 2. 연구내용

- 기술개발 동향 및 수요조사 실시
  - 기술개발 동향 및 환경분석
    - 국내외 정책·시장·기술 동향분석
    - 국내외 기술개발현황 및 국내 기술 인프라·기술 인력 현황 분석
    - 개발기술의 경제성 분석
  - 기술수요 및 기술예측 조사 실시
  - 동향분석 결과를 바탕으로 기술개발 추진방향 정립(SWOT 분석 등)
- 기술개발 전략 수립 및 연구내용 설정
  - 기술개발 전략 수립
  - 연구개발 후보과제 우선순위 도출
  - 과제추진 체계(연구단, 일반과제 등)설정
  - 연구개발 후보과제별 과제카드 작성
- 연구개발과제 기획
  - 연구 목표 및 범위 설정
    - 목표 및 연구범위 설정(세계최고, 국내최초 수준으로 달성 가능한 목표 제시)
      - 세부과제(핵심 요소기술) 도출 및 연구내용 설정
      - 세부과제 연차별·단계별 성과목표(정량적, 정성적)와 성과지표(필수지표 포함)설정 및 성과맵 제시
  - 연구목표 달성을 위한 추진방안 수립
    - 기존 기술·인프라 등의 활용 및 연계 방안 수립
    - 컨소시엄 형태 등 최적 연구추진체계 제안
  - 성과물에 대한 활용방안 및 실용화 추진방안 제시
    - 성과분석 및 검증방안 제시
    - 제도·정책 활용, 현장적용, 시작품 제작 및 시범사업 등 구체적인 실용화 방안 제시
  - 인력투입 계획 및 소요예산 산정
  - 사전타당성 검토
  - 관련 법제도 및 하위규정의 개선사항 도출 및 법제화 방안 마련
  - 과제공모를 위한 RFP 작성 및 평가기준 설정

## 2장 환경분석 및 대응전략

### 1절 기술동향 분석

#### 1. 기술 분류

표 2.1.1 기술분류

대분류 (영문)	중분류, 소분류 (영문)	키워드 (영문)
터널 미기압파 저감 대책 기 술 (technologies for reduction measures of micro-pressur e wave radiating from tunnel exit)	1. 철도 터널 미기압파 기술	터널, tunnel, 철도, 고속철도, rail, railway, 열차, 기차, train, 미기압, 미기압파, micropressure, micro-pressure, 압력파, 압축파, 풍압, 바람, (wind) pressure wave, compression wave, compressive wave, 소닉, sonic, 붐, boom, 격벽, partition, 충격, bang, shock, impact, 진동, vibration, 소음, 노이즈, noise, 완충, 완화, 경감, 저감, 흡수, buffer, reduce, decrease, absorption, 후드, hood, 입구, entrance, 통풍, 통공, 완충공, hole, 에어 샤프트, air shaft, 창, 창문, window, 슬릿, slit, 덕트, duct, 멤브레인, 막, membrane, 사갱, side branch, 열차주행 시험기, moving model rig, tunnel rubbing simulator, 압력 경감 샤프트, Pressure relief shafts, 열차 전두부 형상, train nose shape, 터널 충격 흡수, tunnel Shock absorbing, tunnel shock absorber, 터널 충격 흡수 구조, tunnel shock absorbing construction, 소닉 붐 구조, sonic boom structure, 터널 경감, tunnel buffer, 터널 후드, Tunnel hood
	2. 철도 터널 흡음/방음 기술	방음궤도, 방음매트, 흡음블럭, 방음블럭, mat for sound proofing, track sound absorber, sound absorption block, sound absorption block, acoustical louver, absorber of track bed
	3. TEST BED의 원격 모니터링 시스템 설계	Test-Bed 계측 시스템, 중앙 원격 모니터링 시스템 Measurement system of test Bed, (Remote control monitoring system of measurements

#### 2. 국내외 논문분석

##### 가. 논문분석 범위

2.1.2 논문 분석 기준

분	분석 기준
DB	Web of Science, Thomson Innovation
분석구간	1990.01.01.~2014.11.28.
검색범위	Title, Abstract

나. 기술분류 및 검색 조합식

표 2.1.3 논문 검색 조합식

	검색 조합식	검색 논문	관련 논문
A기술 (철도 터널 미기압파)	ALL=(tunnel) AND ALL=((micro*pressur* or (sonic near2 boom) or (moving and model and rig) or hood or (shock near absorb*) or air*shaft or (compress* near2 wave) or (micro* near2 pressur*) or ((wind* or air) near2 (pressur* or wave*)))) AND ALL=((railway or railroad or locomotive or train*1 or (rail near2 (car or vehicle)) or transit or tram or (rolling adj stock) ));	116	81
B기술 (철도 터널 흡음/방음 기술)	(ALL=(tunnel) AND ALL=((railway or railroad or locomotive or train*1 or (rail near2 (car or vehicle)) or transit or tram or (rolling adj stock)))) AND (ALL=((noise or sound or acoustic*) and (proof* or absorb* or absorpt* or louver or mat) ));	5	3
C기술 (TEST BED의 원격 모니터링 시스템 설 계)	(TI=(tunnel or track) AND ALL=((railway or railroad or locomotive or train*1 or (rail near2 (car or vehicle)) or transit or tram or (rolling adj stock)))) AND (TI=((monitor* or measur* or detect* or meter* or estimat* or evaluat* or apprais* or assess* or gaug* or check or sens*)));	176	75

다. 미기압과 저감후드분야 논문기술동향

(1) 연도별 논문 발표 추이 및 주요 등재저널 동향

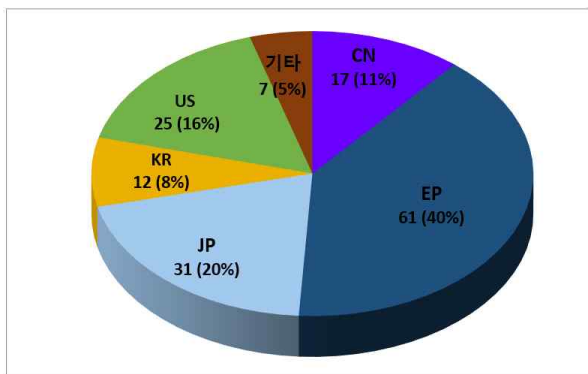
- 터널 미기압과 저감 후드 분야 논문 추이를 살펴보면, 1990년부터 현재까지 총 159건의 관련 논문이 발표되고 있으며, 일부 증감이 있지만 대체적으로 1990년대 후반부터 증가하는 추세를 나타내고 있음.
- 철도 터널 미기압과 기술(A기술) 분야의 논문이 많이 발표되고 있으며, 저널별로는 ACADEMIC PRESS LTD ELSEVIER SCIENCE LTD, PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD, LSEVIER SCI LTD, PROFESSIONAL ENGINEERING PUBLISHING LTD 등 유럽, 미국의 저널에서 많은 논문이 발표되고 있음.



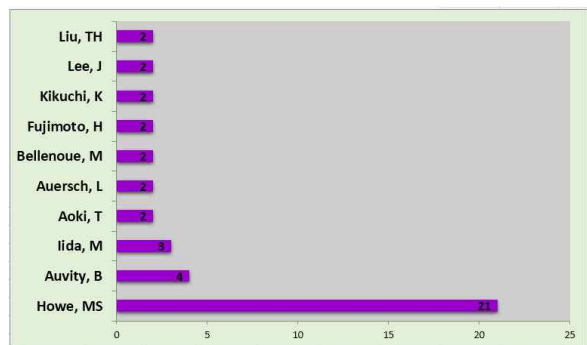
그림 2.1.1 연도별 논문 발표 추이 및 주요 등재 저널

(2) 국가별, 주요연구기관, 주요저자 분석

- 터널 미기압과 저감 후드 분야 논문은 특허와 달리 유럽의 기관에서 많이 발표(40%)되고 있으며, 한국도 약간의 논문 실적이 발표(8%)되고 있는 상황임.
- 또한, 논문 발표 주요저자를 살펴보면, Howe, MS 교수(미국 Boston Univ)가 21건으로 가장 많이 발표한 것으로 나타남.



2.1.2 논문 발표 주요 국가



2.1.3 논문 발표 주요 저자

- 이 분야 최다 연구기관은 미국 Boston Univ가 24건의 논문으로 가장 발표가 많고, 다음으로 일본의 RTRI(Railway Technology Research Institute)로 8건의 논문을 발표하고 있어 해당분야를 선도하고 있음을 알 수 있음.

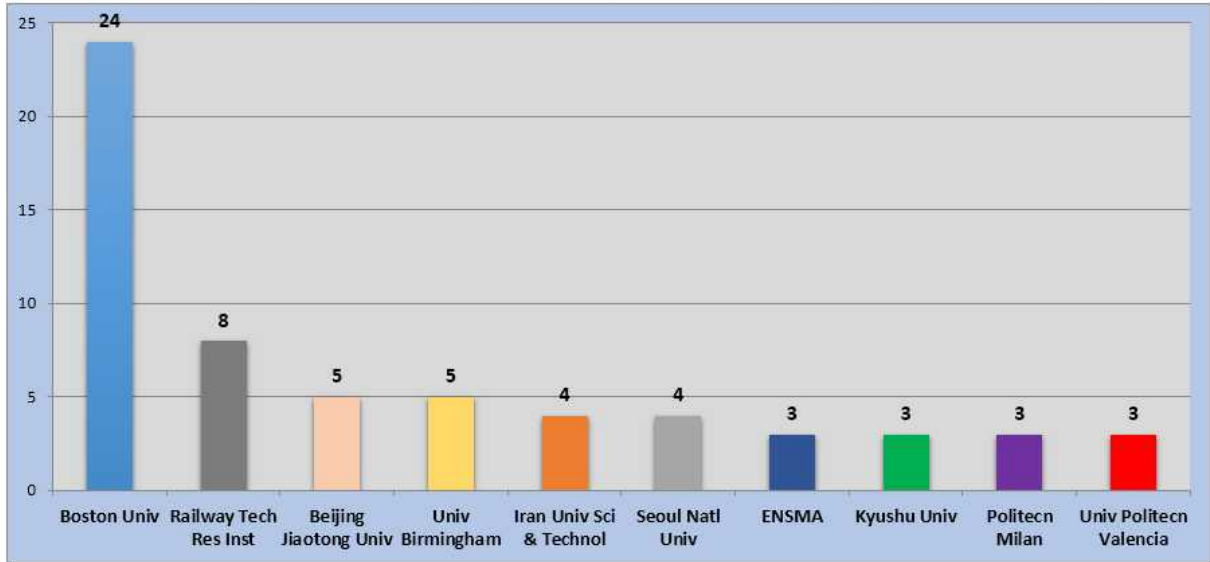


그림 2.1.4 논문 발표 주요 연구기관

(3) 주요 핵심논문 분석

(3-1) 주요 핵심논문 현황

- 고속철도에서의 철도차량-궤도-노반의 지반 진동의 상관관계 및 측정 연구와 관련된 Auersch, L (독일 Bundesanstalt Mat Forsch & Prufung)의 논문이 피인용 79건으로 가장 많음.
- 기타 소음 저감(Noise Control) 등과 관련된 논문이 피인용수가 높은 것으로 보아 관련 내용이 핵심 연구 분야임을 알 수 있음.

표 2.1.4 주요 피인용 논문 현황

	논문제목	저널명	발표년도	피인용수
1	The excitation of ground vibration by rail traffic: theory of vehicle-track-soil interaction and measurements on high-speed lines	ACADEMIC PRESS LTD ELSEVIER SCIENCE LTD	2005	79
2	Aerodynamics of high-speed railway train	PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD	2002	69
3	Theoretical and experimental investigation of the compression wave generated by a train entering a tunnel with a flared portal	CAMBRIDGE UNIV PRESS	2000	33
4	TRACK DYNAMIC BEHAVIOR AT HIGH-FREQUENCIES .1. THEORETICAL-MODELS AND LABORATORY	SWETS ZEITLINGER BV	1995	33

	논문제목	저널명	발표년도	피인용수
	MEASUREMENTS			
5	Numerical investigation of three-dimensional compressible flows induced by a train moving into a tunnel	PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD	1997	32
6	The compression wave produced by a high-speed train entering a tunnel	ROYAL SOC	1998	31
7	Composite real-time image processing for railways track profile measurement	IEEE-INST ELECTRICAL ELECTRONICS ENGINEERS INC	2000	31
8	Impulse noise and its control	PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD	1998	24
9	Fault detection and diagnosis for railway track circuits using neuro-fuzzy systems	PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD	2008	23
10	Acoustic resonances and trapped modes in pipes and tunnels	CAMBRIDGE UNIV PRESS	2008	19

○ 최근 3년 내 발표 논문 중 피인용수가 높은 논문(Hot Paper)을 보면 피인용이 높은 논문과 마찬가지로 철도 궤도에서의 진동 측정(measurement)에 관한 연구내용이 주로 발표되고 있어 관련 분야 연구가 최근 주목받고 있는 분야임을 알 수 있음.

표 2.1.5 3년 내 발표논문 중 피인용수 높은 논문(Hot Paper) 현황

번호	논문제목	저널명	발표년도	피인용수
1	Field Assessment of the Performance of a Ballasted Rail Track with and without Geosynthetics	ASCE-AMER SOC CIVIL ENGINEERS	2010	16
2	Measurement of Distributed Antenna Systems at 2.4 GHz in a Realistic Subway Tunnel Environment	IEEE-INST ELECTRICAL ELECTRONICS ENGINEERS INC	2012	14
3	Track-ground vibrations induced by railway traffic: In-situ measurements and validation of a 2.5D FEM-BEM model	ELSEVIER SCI LTD	2012	11
4	Optimal cross-sectional area distribution of a high-speed train nose to minimize the tunnel micro-pressure wave	SPRINGER	2010	8
5	Timetabling optimization of a single railway track line with sensitivity analysis	SPRINGER	2009	6
6	A delay estimation technique for single and double-track railroads	PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD	2010	5

번호	논문제목	저널명	발표년도	피인용수
7	Field monitoring on the train-induced vibration response of track structure in the Beiluhe permafrost region along Qinghai-Tibet railway in China	ELSEVIER SCIENCE BV	2010	5
8	Theoretical and experimental excitation force spectra for railway-induced ground vibration: vehicle-track-soil interaction, irregularities and soil measurements	TAYLOR & FRANCIS LTD	2010	5
9	Development of track condition assessment model based on visual inspection	TAYLOR & FRANCIS LTD	2011	4
10	Evaluation of conventional methods in Analysis and Design of Railway Track System	IRAN UNIV SCI & TECHNOL	2010	4

### (3-2) 주요 핵심논문 심층분석 (사례)

(가) SCI 논문 : Field Assessment of the Performance of a Ballasted Rail Track with and without Geosynthetics

○ 저널명 : JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING

○ 저 자 : Indraratna, Buddhima; Nimbalkar, Sanjay; Christie, David; Rujikiatkamjorn, Cholachat; Vinod, Jayan

○ 기 관 : Univ Wollongong, Fac Engn, Wollongong, NSW 2522, Australia.

○ 출판사 : ASCE-AMER SOC CIVIL ENGINEERS, 1801 ALEXANDER BELL DR, RESTON, VA 20191-4400 USA

○ 주요 내용 : 본 연구 결과는 토성합성재료(Geosynthetics) 여부에 따른 자갈 궤도상의 성능을 측정하는 연구에 관한 논문임

- 초록: Understanding the complex mechanisms of stress transfer and strain accumulation in layers of track substructure under repeated wheel loading is essential to predict the desirable track maintenance cycle as well as the design of the new track. Various finite element and analytical techniques have been developed in the past to understand the behavior of composite track layers subjected to repeated wheel loads. The mechanical behavior of ballast is influenced by several factors, including the track confining pressure, type of aggregates, and the number of loading cycles. A field trial was conducted on an instrumented track at Bulli, New South Wales, Australia, with the specific aims of studying the benefits of a geocomposite installed at the ballast-capping interface, and to evaluate the performance of

moderately graded recycled ballast in comparison to traditionally very uniform fresh ballast. It was found that recycled ballast can be effectively reused if reinforced with a geocomposite. It was also found that geocomposite can effectively reduce vertical and lateral strains of the ballast with obvious implications for improved track stability and reduced maintenance costs.

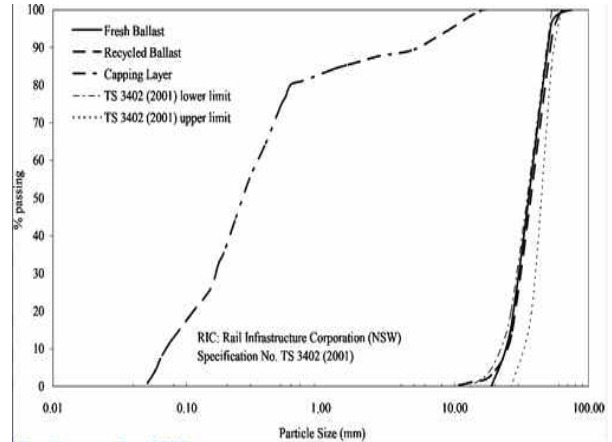
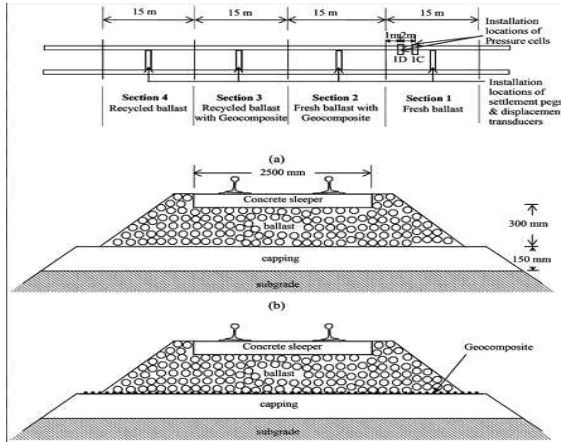


Fig. 1. (a) Details of instrumented track at Bulli; (b) section of ballasted track bed; and (c) section of ballasted track bed with geocomposite layer at the ballast-capping interface

Fig. 2. Particle-size distribution of ballast and capping materials

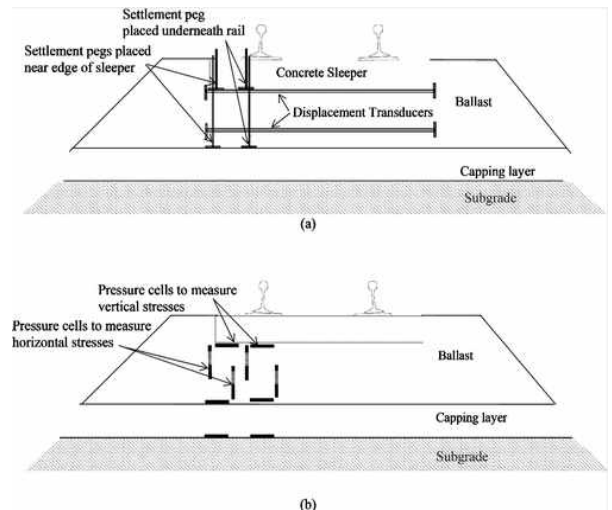
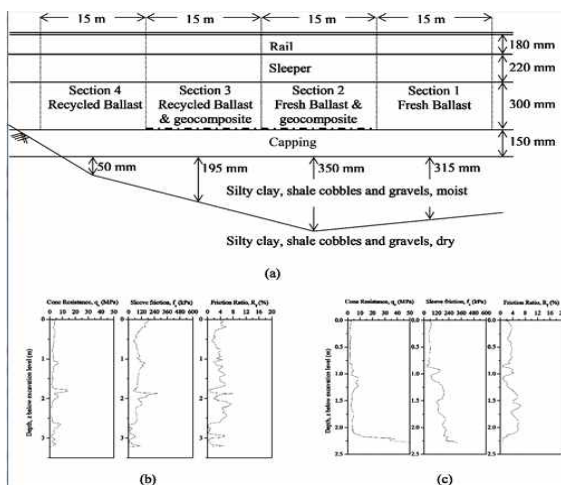


Fig. 3. (a) Longitudinal section of instrumented track at Bulli (b) EFCP test record at center of Section 2 (c) EFCP test record at center of Section 4

Fig. 4. Schematic diagram showing installation of: (a) settlement pegs and displacement transducers; (b) vertical and horizontal pressure cells

그림 2.1.5 핵심논문 주요내용(1)

(나) SCI 논문 : Measurement of Distributed Antenna Systems at 2.4 GHz in a Realistic Subway Tunnel Environment

○ 저널명 : IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY

○ 저자 : Guan, Ke; Zhong, Zhangdui; Alonso, Jose; Briso-Rodriguez, Cesar

○ 기관 : Beijing Jiaotong Univ, State Key Lab Rail Traff Control & Safety, Beijing 100044, Peoples R China.

○ 출판사 : IEEE-INST ELECTRICAL ELECTRONICS ENGINEERS INC, 445 HOES LANE, PISCATAWAY, NJ 08855-4141 USA

- 주요 내용 : 본 연구 결과는 도시철도 터널환경에서의 2.4GHz 대의 분산 안테나 시스템(distributed antenna systems; DAS)에 대한 측정 관한 논문임
- 초록: Accurate characterization of the radio channel in tunnels is of great importance for new signaling and train control communications systems. To model this environment, measurements have been taken at 2.4 GHz in a real environment in Madrid subway. The measurements were carried out with four base station transmitters installed in a 2-km tunnel and using a mobile receiver installed on a standard train. First, with an optimum antenna configuration, all the propagation characteristics of a complex subway environment, including near shadowing, path loss, shadow fading, fast fading, level crossing rate (LCR), and average fade duration (AFD), have been measured and computed. Thereafter, comparisons of propagation characteristics in a double-track tunnel (9.8-m width) and a single-track tunnel (4.8-m width) have been made. Finally, all the measurement results have been shown in a complete table for accurate statistical modeling.

Fig. 1. (a) Classical arched tunnel used in measurements. (b) Schema of the on-train receiving antenna's position. (c) Skeleton map of the tunnel: Tribunal-Príncipe Pío.

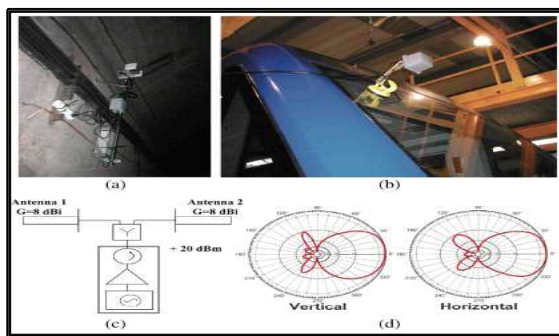
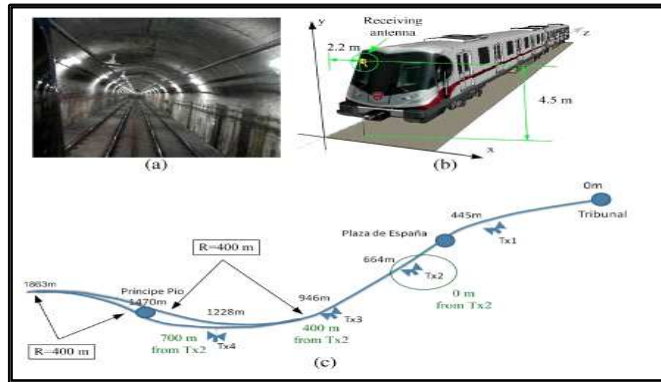


Fig. 2. (a) Test transmitter installed on the tunnel. (b) Antennas' configuration in the cabin of the train. (c) Block diagram of the test transmitter. (d) Antenna patterns.

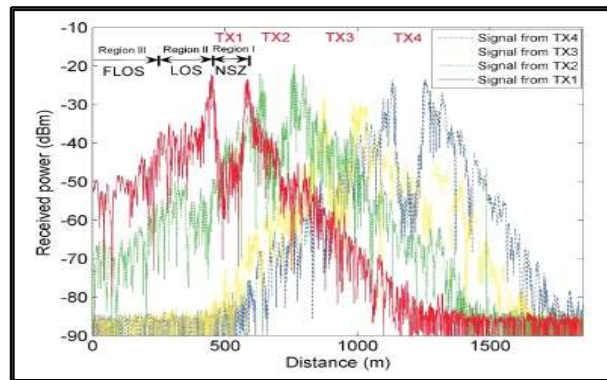


Fig. 3. Received power in the tunnel with four transmitters and a description of different regions.

### 그림 2.1.6 핵심논문 주요내용(2)

#### (3-3) 주요 핵심논문 인용 분석

#### < 지표 설명 >

1. 평균 인용 수는 세트의 모든 항목에 대해 평균 인용 논문 수를 계산하는 간단한 공식으로 인용 횟수 합계를 찾은 검색결과 수로 나눈 값임.

( 예: 인용 횟수 합계: 967 / 찾은 검색결과: 55 = 17.58)

2. h-index\*는 인용 횟수를 기준으로 내림차순으로 순위 지정된 출판물 목록을 기반으로 하고 있어 h-index가 200이면 인용이 20건 이상인 항목이 20개가 있음을 의미하므로 이 지표는 인용 횟수가 아주 많은 논문이나 인용된 적이 없는 논문의 불균형 비중을 줄이기 때문에 유용논문 이용을 신뢰성 있게 파악할 수 있음

\* h-index는 J.E. Hirsch가 개발하여 2005년 11월 15일 자 Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 102 (46): 16569-16572에 발표

(가) 주요 핵심논문인 ‘Field Assessment of the Performance of a Ballasted Rail Track with and without Geosynthetics’ 는 색인 SCI-EXPANDED를 포함하여 인

용건수 16건으로 2014년 현재까지 인용횟수 합계 16건으로 최근 5년간 연간평균 인용수 3.20건에 달하고, 또한 자기인용을 제외한 인용논문 합계 16건으로 항목당 평균 인용수 16, h-index는 1에 달함.

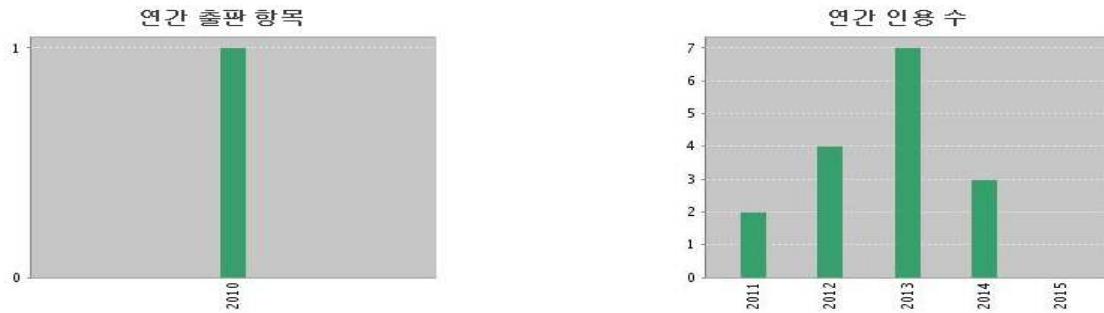


그림 2.1.7 핵심논문 인용 분석(1)

(나) 두 번째 주요 핵심논문인 ‘Measurement of Distributed Antenna Systems at 2.4 GHz in a Realistic Subway Tunnel Environment’ 는 색인 SCI-EXPANDED를 포함하여 인용건수 14건으로 2014년 현재까지 인용횟수 합계 14건으로 최근 5년간 연간평균 인용수 4.67건에 달하고, 또한 자기인용을 제외한 인용논문 합계 14건으로 항목당 평균 인용수 14.00, h-index는 1에 달함.

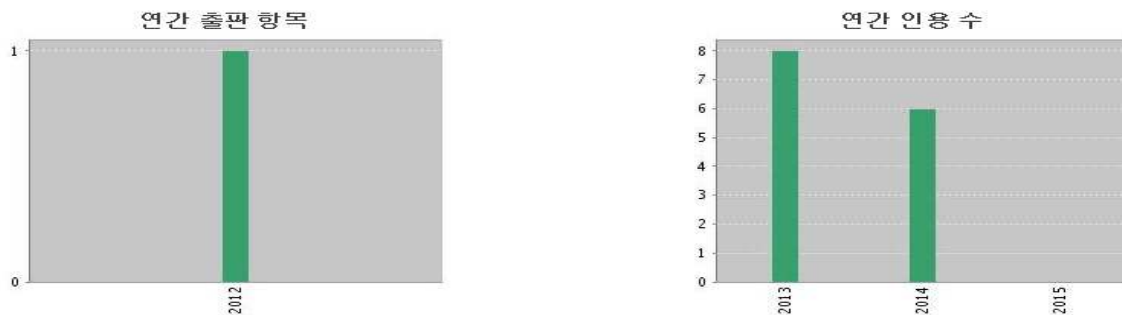


그림 2.1.8 핵심논문 인용 분석(2)

라. 열차의 고속주행시 철도터널내 공기압 특성에 관한 해석연구 논문

- 국내외 문헌조사를 통하여 철도터널의 공기압 특성에 대하여 전산유체역학 해석을 통하여 분석한 사례를 수집함.
- 해석적 연구에 사용되는 도구는 연구자가 자체 개발한 In-house code와 범용 해석프로그램이 있는데, 자체 개발코드가 상대적으로 드물고, 상세한 방법을 파악하기가 어려워 본 연구에서는 범용코드를 이용한 방법론을 중심으로 연구사례를 분석함.

○ 고속 주행시 철도터널내 공기압 특성에 관한 기초연구 사례

- 문헌출처 : 김효규외 2인, 고속 주행시 철도터널내 공기압 특성에 관한 기초연구, 한국터널지하공간학회, 2014
- ANSYS사의 상용코드인 FLUENT를 이용한 사례를 먼저 살펴보기로 함. 본 문헌은, 2차원 축대칭 모델(2D Axisymmetric Model)에 기반하였고, 시간을 종속변수로 하는 비정상상태해석을 수행함. 또한 비점성(inviscid) 특성으로 해석함. 본 문헌에서는 열차의 움직임을 모사하지 않고 Matsuo(1997)이 제시한 입구 압축과 파형을 다음의 수식에 의하여 입력하고 터널 내부를 해석함.

$$\Delta p = \Delta p_c \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left( \frac{V \cdot t}{k \cdot D} \right) \right]$$

- 시뮬레이션 수행결과와 Schulwald 터널에서의 압력기울기 측정결과 비교하여 신뢰성을 검토하였으며, 압력기울기 값을 비교한 결과 평균편차가 6.1%으로 공학적인 오차 크지 않음을 도출함.
- 해석가정조건은 아래의 표와 같이 제시함.

표 2.1.6 해석조건

		적용
터널	연장	200~8000m
	단면적	90.3㎡ / 95.1㎡ / 100.1㎡
열차	주행방향	일방향
	열차속도	300km/h, 350km/h
	열차단면적	9.765㎡

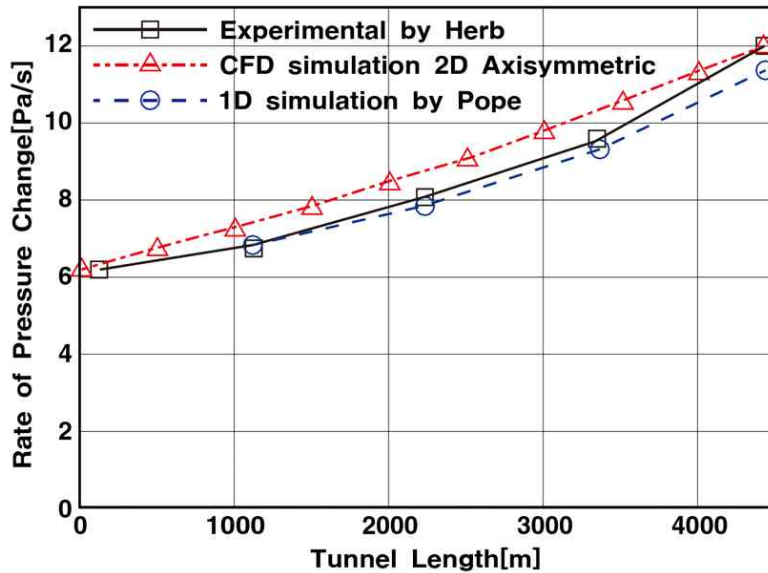


그림 2.1.9 해석결과(1)

- 2차원 해석방법을 이용한 분석으로 실제 열차거동을 모사하지 않고 실험식을 이용하여 입구 압력과의 파형을 경계조건으로 적용하여 분석을 수행하여, 터널내 압력파의 전파에 따른 압력과 기울기 특성을 전산유체해석기법을 이용하여 분석을 수행하였으며 분석결과를 실측결과와 비교하여 모델의 신뢰성을 검증함.
- 열차가 터널에 진입할 때 발생하는 압축파에 대한 수치해석
- 문헌출처 : 김사량, 열차가 터널에 진입할 때 발생하는 압축파에 대한 수치해석, 대한설비공학회 논문집, 2006
  - CD-Adapco사의 상용코드인 STAR-CD를 이용하여 해석하였으며, 터널단면을 원형으로 가정하여 2차원 축대칭 모델(2D Axisymmetric Model)을 적용하였으며, 온도변화를 무시한 비정상상태 점성 압축성유동, k-ε난류모델을 적용함.
  - 터널에서 일정거리만큼 떨어져 정지해 있던 열차가 주행속도까지 가속하여 터널에 진입할 때 터널 입구부에서 생기는 압력파에 대하여, 수치계산시의 초기조건의 영향을 검토하였고, 열차의 출발방법(급출발, 선형, 속도증가(3차, 5차, 7차))에 따른 터널입구부에서 생성되는 압력파에 미치는 영향을 분석함.

표 2.1.7 해석조건

	열차단면적	열차길이	터널연장	열차주행속도
107m <sup>2</sup>	8.9m <sup>2</sup>	100m	430m	350km/h

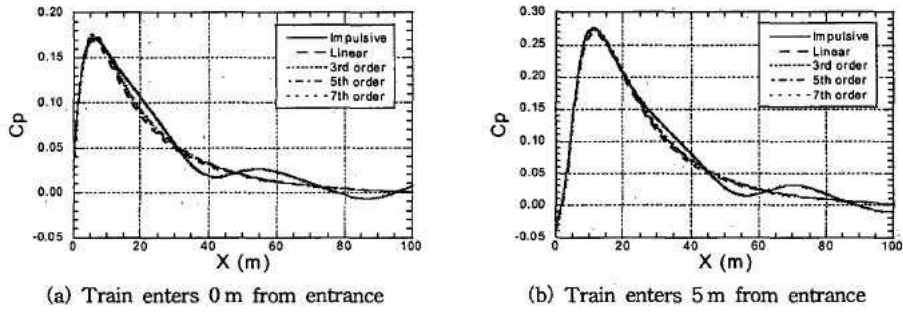


그림 2.1.10 해석결과(2)

- 해석결과로 수치해석 초기 열차의 거동특성(이동속도)에 따라 열차주변에서 발생하는 압력장의 특성이 다르게 나타나며 이러한 영향은 열차가 터널에 진입할 때 발생하는 압력파의 특성에 영향을 주는 것으로 검토됨.
- 분석시 열차형상을 모델링하여 열차의 거동특성을 Dynamic Mesh 방법을 이용하여 검토하였고, Dynamic Mesh에 의한 열차거동을 적용할 때 터널과 외부영역의 제안된 영역에서 발생할 수 있는 문제점을 제시하고 있음. 특히, 열차가 터널진입전에 발생하는 유동장의 문제점을 해결하기 위해 급출발, 최고속도가 되는 지점에 따라 발생하는 유동장의 영향을 고려해야할 필요가 있는 것으로 판단됨.

○ 입구후드가 고속열차 터널의 압력에 미치는 영향에 대한 해석적 연구

- 문헌출처 : 김동현외 4인, 입구후드가 터널의 압력에 미치는 영향에 대한 수치해석적 연구, 한국철도학회 논문집, 1999
- 프랑스 ESI사의 CFD-FASTRAN을 이용하여 분석함. 해석모델로는 2차원 비정상유동을 적용하였으며, TGV열차의 선두부를 축대칭으로 전환함. 또한, Euler 방정식을 적용하였고, 점성모델은 비점성으로 해석함.
- 주요해석 내용으로는 터널입구부 후드설치 유무에 따른 압력구배 특성을 검토하였고, 실험으로 적용된 터널과 축대칭 열차 선두부 모형과 동일하게 적용하여 실험에서 도출된 결과와 비교함.
- 후드형태에 따른 압력파의 특성을 검토하여 터널입구부의 형상(위치, 크기)에 따른 영향을 검토함.

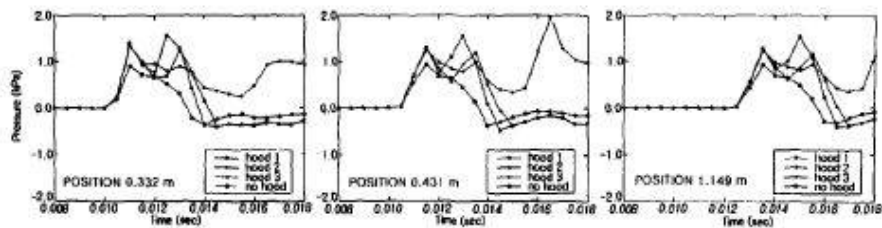


그림 2.1.11 해석결과(3)

○ 혼합차원기법을 이용한 고속열차의 터널 통과시 발생하는 비정상 압축성 유동장의 수치 해석

- 문헌출처 : 김태윤외 4인, 혼합차원기법을 이용한 고속열차의 터널 통과시 발생하는 비정상 압축성 유동장의 수치해석, 한국항공우주학회지, 2002
- Roe FDS를 사용한 축대칭 Euler Solver를 적용하였고, 터널내부에서의 횡방향 속도성분을 무시하여 1차원으로 가정하는 혼합차원기법을 적용하여 움직이는 열차 주위의 영역을 제외한 터널내부 영역은 1차원 Euler방정식이 적용됨. 터널 외부미기압과와 터널 내부압력변동의 정량적 특성을 고려하기 위해서는 열차근방의 유동장을 3차원 또는 축대칭으로 해석함.

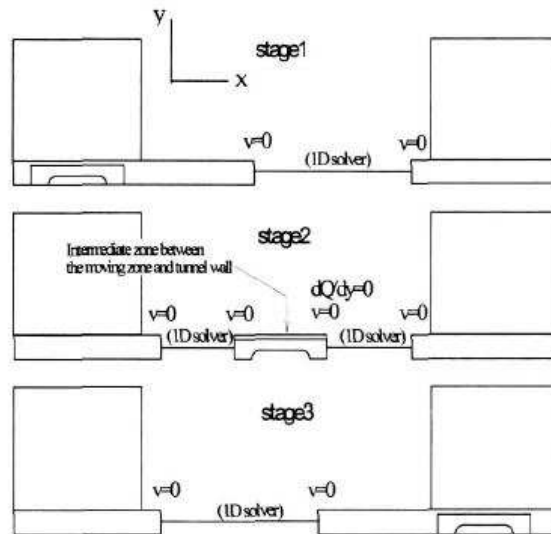


그림 2.1.12 분석방법

- 이 연구에서 혼합차원기법을 적용한 것은 2000년대 초반의 하드웨어 자원으로는 열차 및 터널의 전영역을 3차원 방정식으로 해석하는 것이 과도한 시간소요로 인하여 현실적으로 거의 불가능하였기 때문임.

○ 3차원 형상을 고려한 고속철도에 의한 터널내 압력과 전파의 CFD해석

- 문헌출처 : 신대용외 5인, 3차원 형상을 고려한 고속철도에 의한 터널내 압력과 전파의 CFD해석, 한국전산유체공학회지, 2012
- ANSYS사의 FLUENT 코드를 이용하여 해석하였으며, 열차거동해석을 위하여 Dynamic Mesh layering기법을 적용하였고, 유동상태는 압축성 이상기체, 벽면은 비점성모델을 적용함.
- 해석영역은 2차원 대칭 수치해석기법에 3차원 수치해석기법과 공기역학 이론을 적용, 3차원 수치해석과 2차원 수치해석의 결과를 비교함.
- 분석결과로는 단순한 터널 내 고속철도의 압력과의 최고 압력이나 그 추이를 위

한 해석이라면 2차원 축 대칭 수치 해석으로도 충분히 해석 가능하나, 수직구 주변의 압력 변화의 보다 정확한 해석을 위해서는 수직구의 입구와 출구 단면적 비를 고려한 3차원 수치해석 법이 더 적합함을 증명함. 즉, 2차원 해석모델의 경우 구조적인 형상변화에 따른 영향을 검토하는데 한계가 있으므로 구조적인 변화가 있으며 단면적 비율에 대한 영향을 고려하여 검토하는 경우 3차원 해석모델이 타당함은 결과를 얻음.

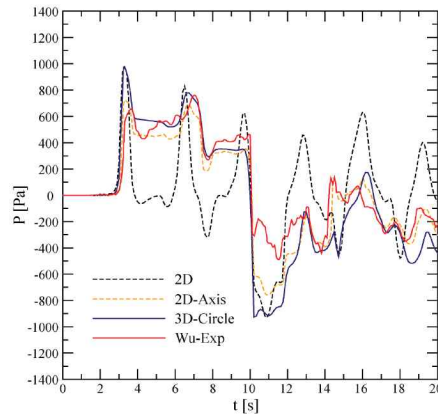


Fig. 8 Total comparison of data result

그림 2.1.13 해석결과(4)

- 국외에서 고속으로 터널에 진입하는 열차에 의해 터널 입구부에서 발생한 압력파의 거동을 전산유체 해석기법을 활용하여 압력파의 특성을 예측한 연구사례를 중심으로 조사를 수행함.
- 터널에 진입하는 고속열차에 의한 압력파의 3차원 수치예측
  - 문헌출처 : David Uystepuyst외 4인, Efficient 3D numerical prediction of the pressure wave generated by high-speed trains entering tunnels, Computers & Fluids, 2010
  - 이 연구는 해석 모델이나 코드에 대한 정확한 명칭을 명시하고 있지는 않지만, 지배방정식은 Navier-Stoke에 기초한 유한체적법을 적용하고 있는 것으로 판단됨.
  - 주요 연구내용은 해석격자 형태에 따른 결과를 실험값과 비교하여 신뢰성 향상을 도모하는 것으로 격자의 생성 및 간격에 따라 실험치와 최소 3%에서 최대 11%까지의 오차를 나타냄. 즉, 이 연구에서는 해석적 기법 적용시에 해석격자 작성의 중요성을 강조하고 있음.

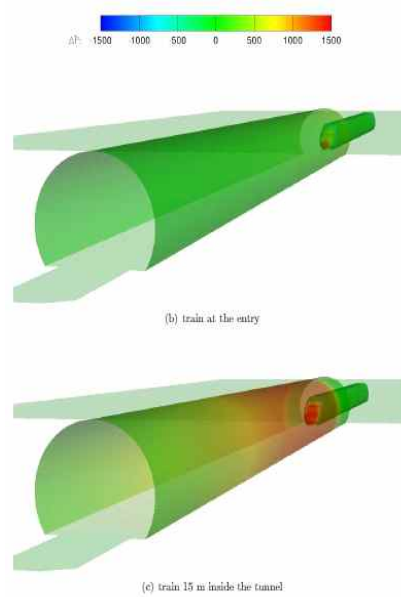


Figure 20: Generation and propagation of the compression wave (in Pa).

그림 2.1.14 해석결과(5)

○ 터널내에서 열차 교행시에 대한 수치해석

- 문헌출처 : Chia-Ren Chu와 4인, Numerical simulation of two trains intersecting in a tunnel, Tunnelling and Underground Space Technology, 2014
- ANSYS사의 FLUENT 코드를 이용하여 해석하였으며, 열차거동 해석을 위한 Sliding Mesh기법을 적용하였고, 유동상태는 압축성 이상기체, 난류모델은 ENG k- $\epsilon$  난류 모델을 적용함.
- 연구목적은 터널내에서 교차하는 두 열차의 압력파를 해석하여 실측결과와 비교 분석함.

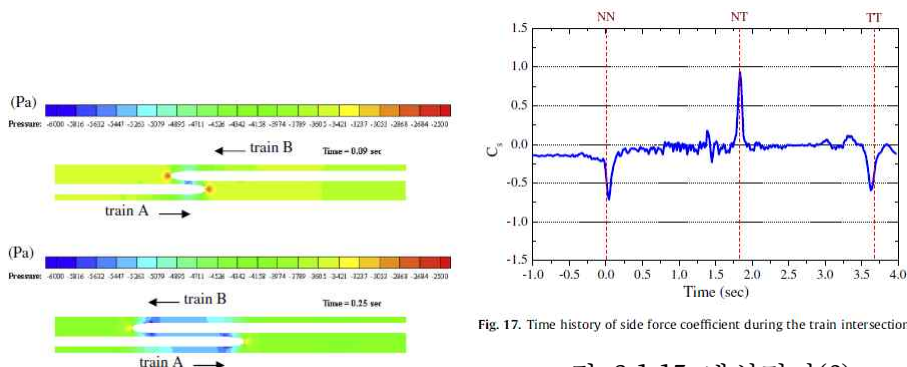


Fig. 17. Time history of side force coefficient during the train intersection.

그림 2.1.15 해석결과(6)

- 앞서 검토된 문헌의 경우, 터널내의 압축파해석시에는 벽면 점성을 비점성 (inviscid)로 해석하는 경우가 대부분이었으나, 이 연구에서는 2-equation 난류 모델을 적용함. 향후 연구시에는 유동상태의 가정에 대한 면밀한 검토와 벽면에서의 유동해석모사에 대한 연구가 반드시 필요할 것으로 판단됨.

○ 터널내를 통과하는 열차의 압력장 분석

- 문헌출처 : Jakub Novák, Single Train Passing through a Tunnel, European Conference on Computational Fluid Dynamics, 2006
- ANSYS의 FLUENT코드를 이용하여 해석하였으며, 열차거동 해석을 위한 Sliding Mesh기법을 적용하였고, 유동상태는 압축성 이상기체로 가정함.

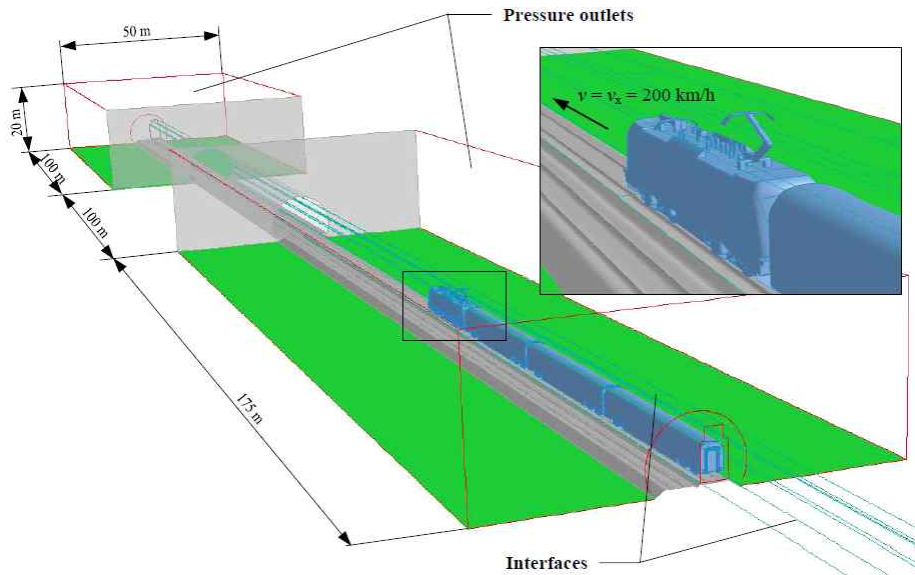


그림 2.1.16 해석모델링

- 비압축성 모델과 압축성 모델과의 차이점을 검토하여 압축성 모델 사용의 타당성을 입증하였으며, 3차원 형상특성을 고려한 열차에서의 Drag Force, 터널내 압력 변동등을 해석함.

○ 터널 입구부의 형상에 따른 압력과 특성해석

- 문헌출처 : Michael Schlämmer외 1인, CFD-Simulations on the Generation of the Pressure Wave When a High Speed Train Enters a tunnel with Different Portal Modifications, Bluff Bodies Aerodynamics & Applications, 2008
- ANSYS사의 CFX코드를 이용하여 해석하였으며, 열차거동 해석을 위한 Sliding Mesh기법을 적용하였고, 유동상태는 압축성 이상기체로 가정하였었다. 난류모델로는 SST모델(with a second order backward euler scheme for time discretization)을 적용함.
- 터널의 입구부 형상에 따르는 압력파의 특성을 해석하고 실험적 방법과의 비교를 통하여 수치해석적 방법의 타당성을 검증함.

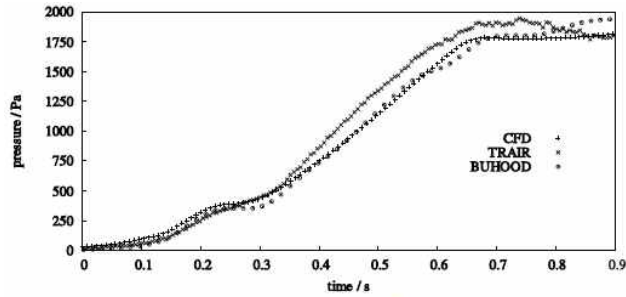


Figure 4: Comparison of calculating methods with model experiment

그림 2.1.17 해석결과(7)

- 해석적 방법에 대한 연구문헌 조사결과, 다양한 종류의 상용코드를 사용하여 해석이 가능함을 알 수 있음. 그러나, 차원해석의 종류와 난류모델의 선정에 있어서는 연구자마다 큰 차이를 나타냄. 또한, 미기압파(Micropressure Wave)와 압력장의 해석은 물리적으로 큰 차이를 나타내므로 해석목적에 부합하는 해석방법의 연구가 반드시 필요함.
- 움직이는 열차의 거동모사를 위한 Sliding Mesh 또는 Dynamic Mesh의 채용은 하드웨어의 계산속도를 크게 저하시키고 많은 량의 계산자원이 소요됨으로서 다양한 해석케이스를 실행하는데 영향을 미칠 수 있음.
- 해석적 연구는 해석에 의하여 도출된 물리량을 실험적 연구에서 도출된 값과 비교하는 경우가 많은데, 기준이 되는 실험적 결과값 또는 실측치가 불안정하거나 샘플링 수가 적은 경우에는 이를 추종하는 해석의 신뢰성 자체가 크게 흔들릴 수 있으므로 해석적 연구와 동시에 신뢰성 있는 실측값이나 실험적 연구결과치가 성립되어 있어야 하는 것이 필수적임.

### 3. 국내외 특허분석

#### 가. 특허분석 범위

##### 2.1.8 특허분석 기준

분	분석 기준				
DB	Thomson Innovation				
검색국가	미국				
분석구간	출원, 등록	유럽	일본	한국	중국
	1990.01.01. ~ 2014.11.28.	출원, 등록	출원, 등록	출원, 등록	출원
검색범위	Title, Abstract, Claim				

#### 나. 기술분류 및 검색 조합식

표 2.1.9 특허 검색 조합식

기술구분	검색 조합식	검색 특허	관련특허
A 기술 (철도 터널 미기압파 기술, 철도 터널 흡음/방음 관련기술)	CTB=(tunnel) AND CTB=((micro*pressur* or (sonic near2 boom) or (moving and model and rig) or hood or (shock near absorb*) or air*shaft or (compress* near2 wave) or (micro* near2 pressur*) or ((wind* or air) near2 (pressur* or wave*)))) AND CTB=((railway or railroad or locomotive or train*1 or (rail near2 (car or vehicle)) or transit or tram or (rolling adj stock)) AND DP>=(19900101);	345	115
	(CTB=(tunnel) AND CTB=((railway or railroad or locomotive or train*1 or (rail near2 (car or vehicle)) or transit or tram or (rolling adj stock))) AND DP>=(19900101)) AND (CTB=((noise or sound or acoustic*) and (proof* or absorb* or absorpt* or louver or mat) ));		
B 기술 (TEST BED의 원격 모니터링 시스템 설계기술)	(CTB=(tunnel or track) AND CTB=((railway or railroad or locomotive or train*1 or (rail near2 (car or vehicle)) or transit or tram or (rolling adj stock))) AND DP>=(19900101)) AND (TAB=((monitor* or measur* or detect* or meter* or estimat* or evaluat* or apprais* or assess* or gaug* or check or sens*) and (wifi or wireless)));	446	116

다. 특허기술 동향

(1) 출원년도 및 국가별 특허출원 동향

- 터널 미기압과 저감 후드 분야의 특허동향을 살펴보면, 1990년부터 현재까지 총 231건의 관련 유효특허가 출원되고 있음.

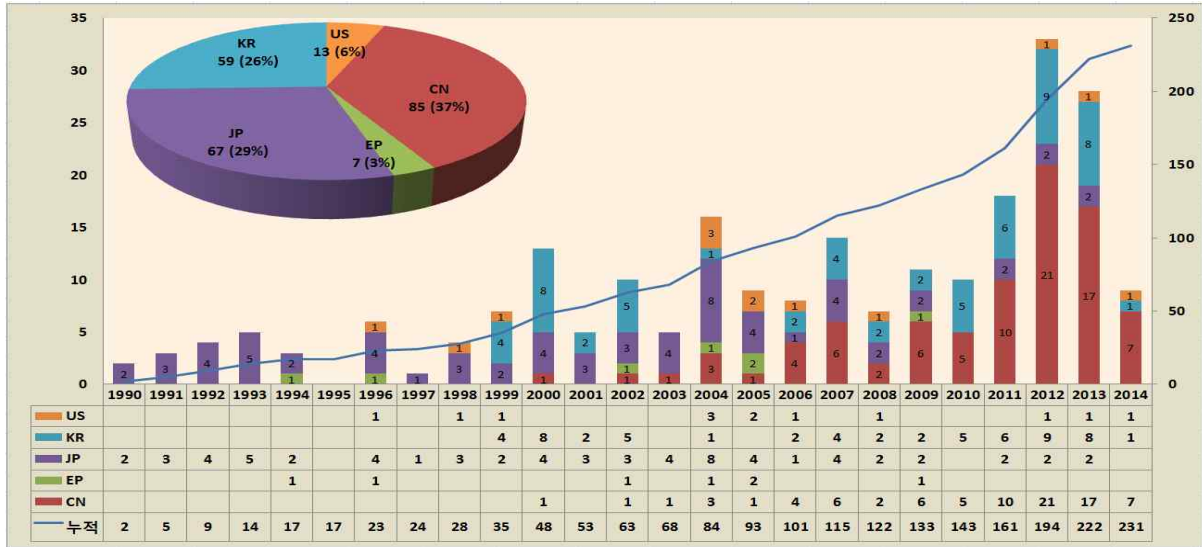


그림 2.1.18 출원년도 및 국가별 출원추이

- 국가별로는 중국이 37%(85건)로 최다이며, 일본, 한국, 미국, 유럽의 순으로 출원되고 있음.
- 우리나라는 2006년 이후 출원 특허가 전체 특허의 60%이상을 차지하는 등 최근 관련 분야 관심이 증가하고 있음이고 보여짐.
- 중국은 2006년 이후 전체 특허의 90% 이상을 출원하는 등, 최근의 기술 상승세가 매우 높게 나타나고 있음.

(2) 세부기술별 특허출원 동향

- 세부기술별 특허출원 동향을 보면, 철도터널 미기압과 저감기술(A기술)과 원격 모니터링기술(B기술) 분야 특허가 50%씩 동일하게 나타나고 있음 다만, 2000년대 이후 원격 모니터링기술(B기술)의 특허가 지속적으로 증가 추세에 있음.

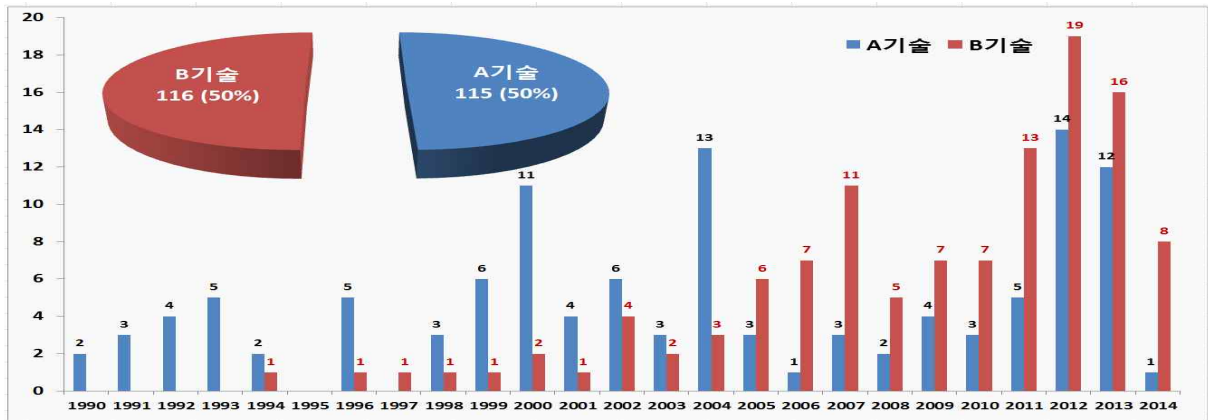


그림 2.1.19 세부기술별 특허출원동향

(3) 주요 출원인 분석

○ 특허를 많이 출원한 상위 5개의 출원인(Top 5 Assignee)을 살펴보면, 한국의 KRRI, 일본의 HITACHI, RTRI, 중국의 북경교통대 등이 많은 출원을 하고 있음. 이 분야 다 출원인 들은 일본의 HITACHI를 제외하고 대부분 자국 특허에 국한되어 출원한 것을 통해, 국제 기술 경쟁이 가속화하지는 않은 것으로 보여짐.

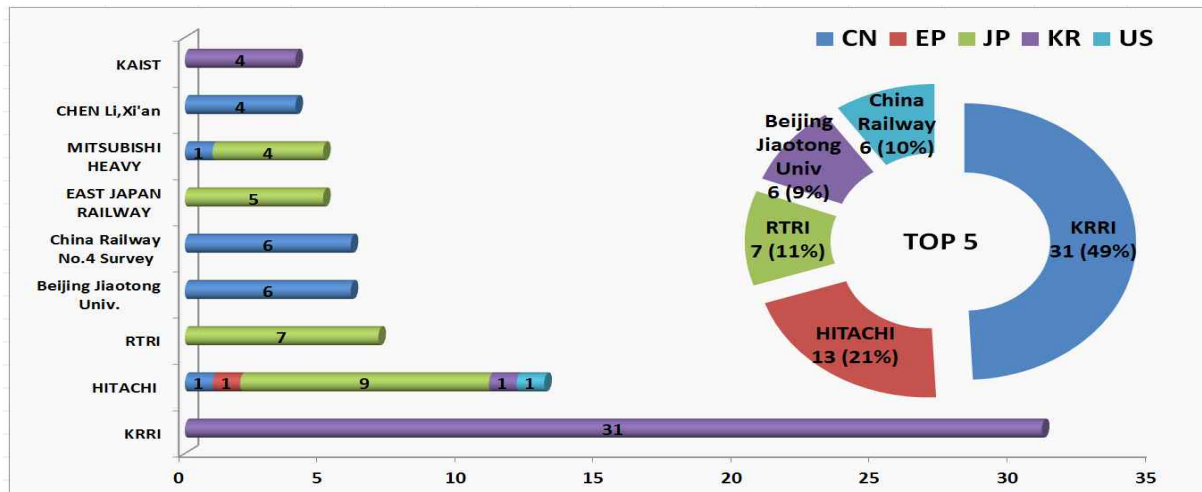


그림 2.1.20 주요 출원인 동향

○ 한국의 KRRI, 중국의 북경교통대가 2010년대에 들어서도 지속적으로 많은 특허를 출원 하고 있는 것을 통해, 이 분야에 대한 기술개발이 지속적으로 수행되고 있음을 확인할 수 있음. 반면에, 일본의 HITACHI는 2010년 이후 특허출원이 정체되어 있음.

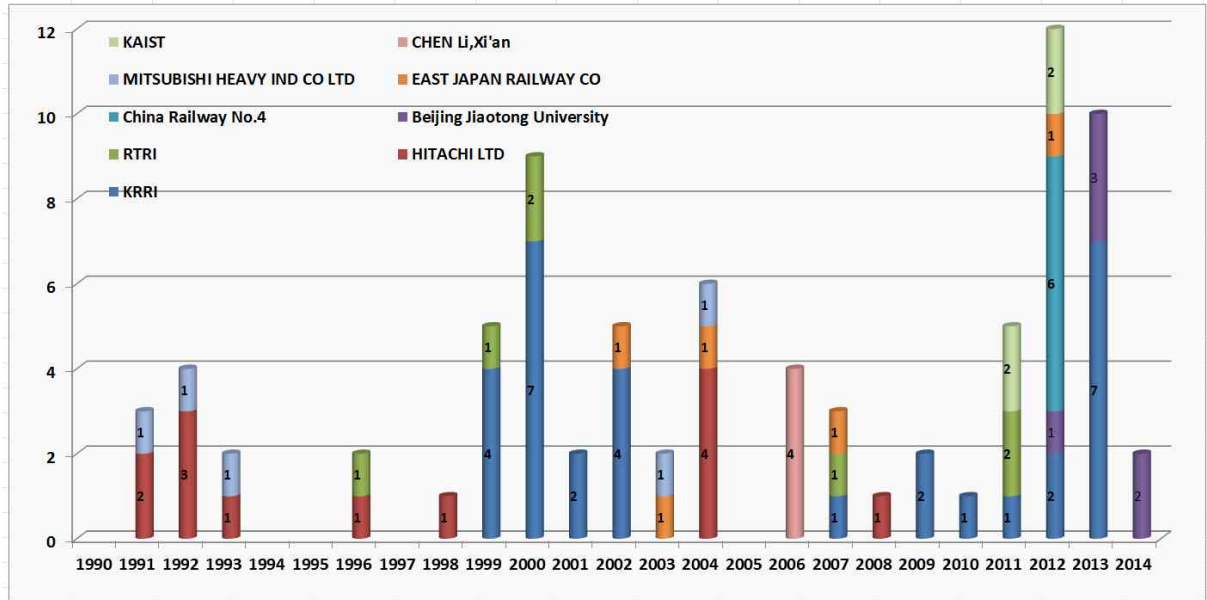


그림 2.1.21 주요 출원인 연도별 출원동향

(4) 국가별 기술 분포

- 출원국가별 세부기술 특허분포를 살펴본 결과 일본, 한국이 철도터널 미기압과 저감기술(A기술) 분야 특허가 많이 나타나고 있음. A기술 분야는 일본이 가장 많은 특허를 출원하고 있는 것으로 나타남.
- 최다 출원국가인 중국의 경우 원격 모니터링(B기술) 특허를 가장 많이 출원 하고 있음.
- 중국의 최근 철도건설 확대와 함께, 이 분야에 대한 특허 상승세가 매우 높게 나타나고 있는 것으로 판단됨. 중국이 최근 B기술에 대한 집중도가 높게 나타나는 것을 통해, 한국에서도 상대적으로 약한 B기술 분야에 대한 기술확보가 필요할 것으로 판단됨.

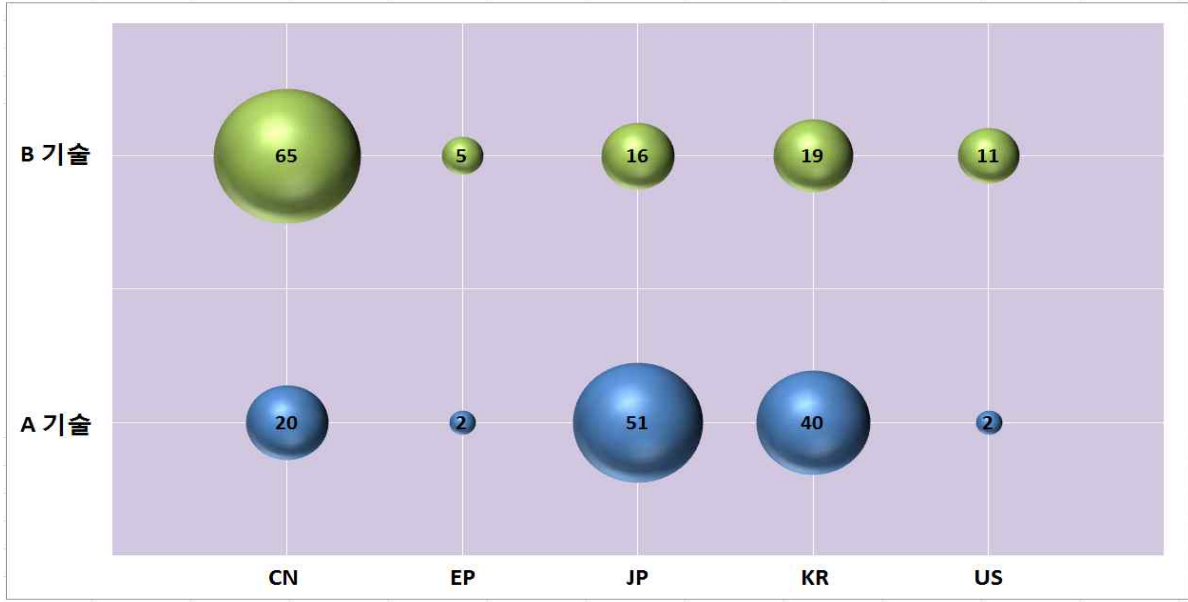
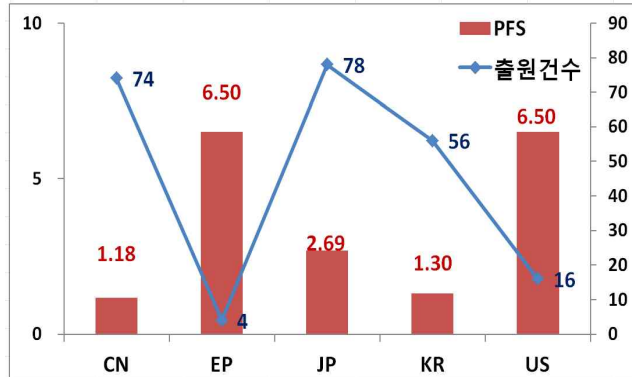


그림 2.1.22 기술별/국가별 기술분포(버블형)

(5) 우선권 국가 (Priority Country)별 특허분포 지수분석

(5-1) 시장확보지수 (PFS : Patent Family Size)

- (지표 설명) 특정 국가에서 상업적인 이익 또는 기술경쟁 관계에 있을 때 해외에 특허를 출원하므로, Family Patent 數가 많을 때 특허를 통한 시장성이 크다고 판단되어 이를 시장확보력의 지표로 사용함.
- (계산식)
  - 국가별 시장확보지수(PFS) = (∑ 해당국가 특허별 패밀리) / 해당국가 특허건수
- (분석결과)
  - 유럽의 시장확보지수(PFS)가 6.50로 가장높지만, 특허건수가 매우 작아 일반화된 결론으로 보기는 어려움.
  - 특허 건수가 많은 중국, 일본, 한국의 경우, 유럽 및 미국에 비하여 패밀리 특허가 매우 작은 수준임.
  - 한국은 향후 해외시장을 고려한 해외패밀리 특허의 확보가 요구됨.



2.1.23 국가별 출원건수 및 시장확보지수

(5-2) 인용도지수 (CPP : Cites Per Patent)

- (지표 설명) 특정 국가의 특허들이 이후 등록되는 특허들에 의해 인용되는 횟수가 많을 수록 기술경쟁력이 높으므로, 인용도지수(CPP)가 클수록 원천특허/핵심특허를 많이 보유한 정도를 나타내는 지표로 사용함.
- (계산식)
  - 국가별 인용도 지수(CPP) = (∑ 해당국가 특허별 피인용수) / 해당국가 특허건수
- (분석결과)
  - 미국의 인용도지수(CPP)가 8.56으로 가장 높게 나타나 원천특허/핵심특허를 많이 보유한 것으로 판단할 수 있음.
  - 이에 반해, 한국은 유럽, 미국 등과 비교할 때, 특허건수에 비해 인용도지수(CPP)가 매우 낮은 수준으로, 원천특허/핵심특허 비중이 낮은 것으로 판단할 수 있음.

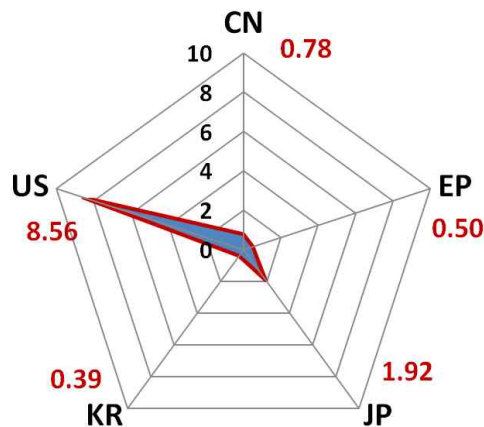
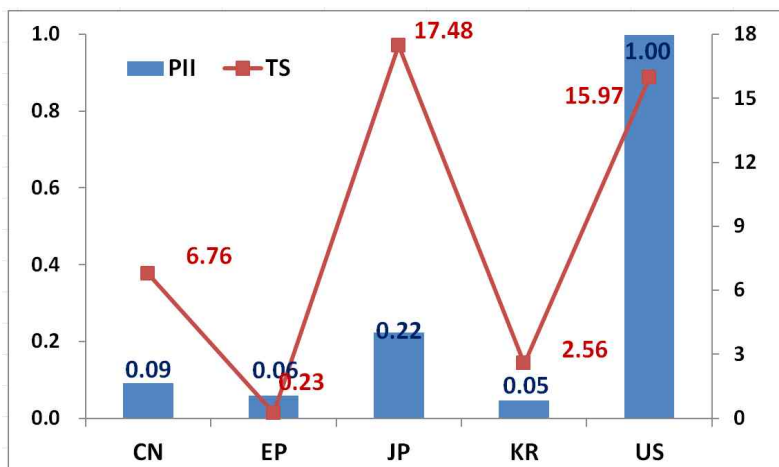


그림 2.1.24 국가별 인용도 지수

(5-3) 영향력지수(PII : Patent Impact Index) 및 기술력지수(TS : Technology Strength)

- (지표 설명) 영향력지수는 특정 국가가 소유한 기술의 질적수준을 측정하는 지수이며, 기술력지수는 특정 국가의 기술보유 양적수준(특허건수)과 영향력지수(질적수준)을 함께 나타냄.
- (계산식)
  - 국가별 영향력 지수(PII) = 해당국가 특허 인용도지수 / 전체(모든국가) 특허
  - 인용도지수국가별 기술력 지수(TS) = 해당국가 특허건수×해당국가 영향력 지수
- (분석결과)
  - 미국의 영향력지수(PII)가 1.00로 가장 높게 나타나 질적 수준에서 우수하며, 양적 수준(특허건수)을 고려한 기술력지수(TS)에서도 15.97로 우수
  - 일본은 특허건수가 많음에 따라 기술력지수가 17.48로 가장 높게 나타남.
  - 우리나라는 영향력지수, 기술력 지수 모두 낮게 나타나고 있음.



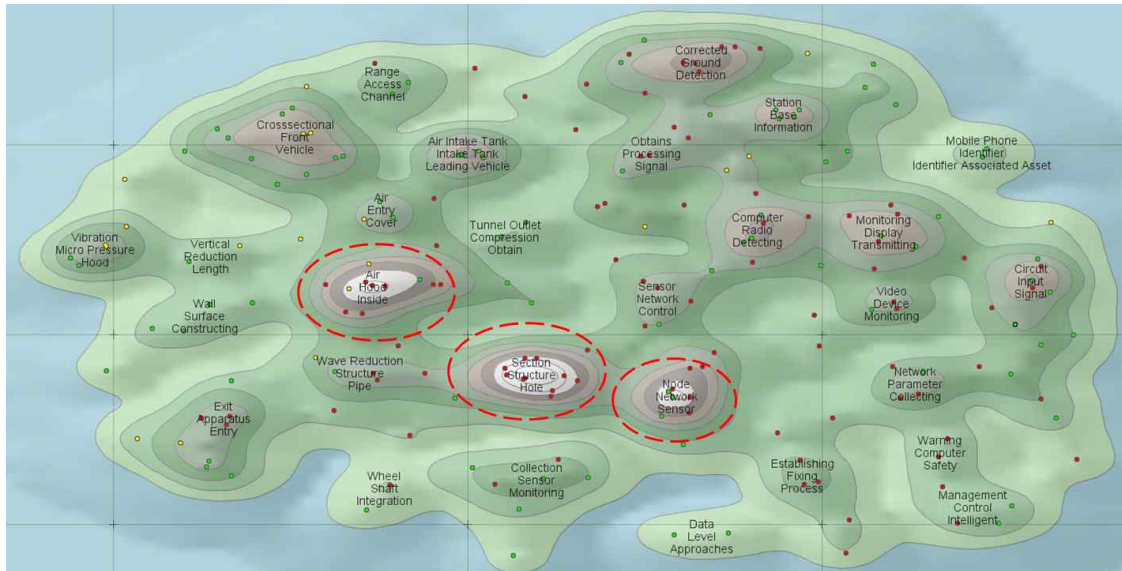
2.1.25 국가별 영향력지수 및 기술력지수

(6) 기술분야 특허 분포도

(6-1) Text mining을 통한 특허 분포

- 터널 미기압과 저감 후드 분야 관련 검색결과 791건 중 검색 특허 중 최종 231건의 유효 특허기술이 분포함.
- 등고선 꼭지점이 높은 Air/Hood/Inside, Section/Structure/Hole, Node/Network/Sensor 등 2개 Text에 특허가 많이 분포하고 있어 관련 분야의 기술 집중도가 높은 것으로 판단 할 수 있음.
- 특허, 2014년에 출원된 최신 특허들을 보면 Device for accurately positioning railway

locomotive, Real-time detection method for high-speed rail, Online monitoring track traffic axle temperature system 등 원격 모니터링(B기술)과 관련된 기술이 나타나고 있음.

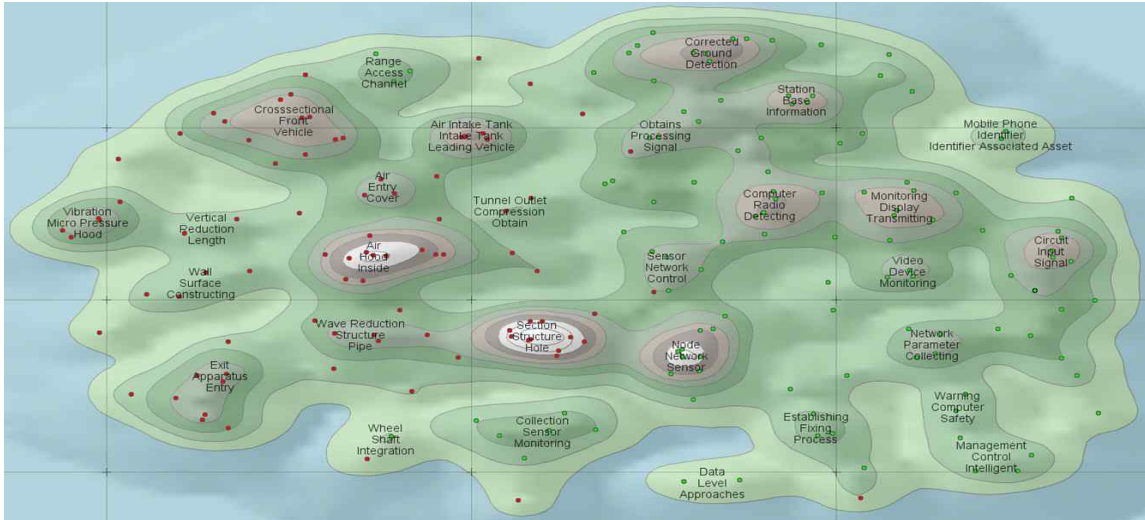


● 2010년 이후 ● 2000-2009 ● 1990-1999

그림 2.1.26 특허 등고선 맵

(6-2) 핵심기술(중분류 기준)을 통한 특허 분포

- 철도터널 미기압과 저감기술(A기술) 분야의 경쟁이 치열하며, 한국의 KRRI, 일본의 HITACHI 및 RTRI가 이 분야 기술을 주도하고 있음.
- 한국의 경우 KRRI, KAIST 등 대부분의 기관이 A기술에 집중하고 있는 것으로 나타나, 향후 IoT 기술 등과 연계하여 원격 모니터링(B기술)에 대한 관심도 높여야 할 것으로 판단됨.



■ A. 철도터널 미기압과 저감기술 ■ B. 원격 모니터링 기술

그림 2.1.27 세부기술별 특허 등고선 맵

(7) 주요 핵심특허 현황

○ 철도 위험음향 및 위치검지, 정보시스템에 대한 STEPHENS ROBERT DOUGLAS의 미국 공개특허 US6216985B1건의 피인용 건수가 41건으로 가장 많으며, 기타 원격 모니터링과 관련된 특허들이 피인용 건수가 많아 이러한 특허들을 중심으로 주요 특허를 선정하여 핵심특허 권리 분석을 할 수 있음.

표 2.1.10 주요 핵심특허 현황 (피인용수 順)

공개번호	발명의 명칭	출원인 정리	피인용수 (Forward)
US6216985B1	Railway hazard acoustic sensing, locating, and alarm system	STEPHENS ROBERT DOUGLAS	41
US6275525B1	Enhanced method for adaptive equalization technique in mobile wireless systems	National Semiconductor Corporation	24
CN101254791A	Rail transit train automatic monitoring system based on communication	Beijing Helishi System Engineering Co. Ltd.	23
US7222003B2	Method and computer program product for monitoring integrity of railroad train	GENERAL ELECTRIC	21
JP2005212740A	VEHICLE BODY STRUCTURE FOR RAILWAY LEADING VEHICLE	EAST JAPAN RAILWAY CO	17

US20060098580A1	Apparatus and method capable of beam forming adjustments	LI Q	15
US20100141445A1	Multi-Mode Commissioning/Decommissioning of Tags for Managing Assets	Savi Networks Inc.	13
JP7089439A	SHAPE OF TOP OF ROLLING STOCK HEAD VEHICLE	WEST JAPAN RAILWAY CO	11
JP2007082075A	WIRELESS COMMUNICATION SYSTEM	HITACHI KOKUSAI ELECTRIC INC	11
JP2005155129A	TUNNEL SHOCK ABSORBING WORK	EAST JAPAN RAILWAY CO	10

(8) 주요 핵심특허 심층 분석 (사례)

(8-1) 주요 핵심특허 심층분석 (권리성 분석)

○ 1990년이후 피인용수가 가장 많은 STEPHENS ROBERT DOUGLAS의 미국 공개특허 US6216985B1건은 철도 위험 음향 감지, 위치 결정 및 경보 시스템에 관한 기술이며, 2000년대 이후 출원특허 중에서는 통신을 기반으로 철도 운송 열차 자동 모니터링 시스템에 대한 중국 공개특허 CN101254791A의 피인용도가 가장 높게 나타남. 이러한 특허들을 중심으로 세밀한 검토를 통한 고려가 필요할 것으로 판단됨.

표 2.1.11 주요 핵심특허 현황

1	분류	B기술 (원격 모니터링 기술)	특허번호 (출원번호)	US1998134628A	특허번호 (공개번호)	US6216985B1
	출원인	STEPHENS ROBERT DOUGLAS	출원일	1998-08-13	공개일	2001-04-17
	발명의 명칭	Railway hazard acoustic sensing, locating, and alarm system				
	대표도면					

내용	철도 위험 음향 감지, 위치 결정 및 경보 시스템에 관한 기술
주요 청구항	<p>1. A method for detecting a physical event which affects a metal guideway transportation system comprising the steps of:</p> <p>(a) introducing predetermined acoustic waves onto a metal guideway of said metal guideway transportation system at a first location, said predetermined acoustic waves propagating via said metal guideway;</p> <p>(b) acoustically monitoring said metal guideway at a second location; and</p> <p>(c) detecting a change in said predetermined acoustic waves, said change indicates a physical event has occurred between said first location and said second location whereby said metal guideway transportation system may be acoustically monitored substantially continuously, for low acoustic energy events.</p>
법적상대 (회피전략)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 이 특허는 1998년 출원 이후 지금까지 유지되고 있는 등록특허임</li> <li>- 이에 따라, 향후 관련 분야 연구를 진행함에 있어 해당 특허기술에 대한 면밀한 검토를 통해 해당기술을 침해하지 않고 회피하여 기술개발이 이루어질 수 있도록 하여야 할 것임</li> </ul>

2	분류	B기술 (원격 모니터링 기술)	특허번호 (출원번호)	US1999471683A	특허번호 (공개번호)	US6275525B1
출원인	National Semiconductor Corporation	출원일	1999-12-23	공개일	2001-08-14	
발명의 명칭	Enhanced method for adaptive equalization technique in mobile wireless systems					
대표도면						
주요 내용	디지털 무선 시스템에서의 모바일 신호 송수신 관련 기술					
주요 개요	<p>1. A method for adaptively equalizing an output of a digital communication channel, comprising:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>generating an initial channel estimation;</li> <li>determining an initial set of metric states of a trellis, based on a training sequence of known symbols of a received input signal comprising a sequence of symbols;</li> <li>updating the set of metric states according to the initial channel estimation and the received signal;</li> <li>updating a set of paths for the metric states using a delayed tentative decision of a symbol of the received signal, to determine a set of survivor paths; and</li> <li>updating the channel estimation, based on the updated metrics, delayed tentative decision, and the received signal;</li> </ul> <p>and further comprising iterated training to determine the metric states of the trellis, wherein in each iteration, the training sequence is reversed.</p>					
법적상태 (회피전략)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 이 특허는 1999년 출원 이후 지금까지 유지되고 있는 등록특허임</li> <li>- 이에 따라, 향후 관련 분야 연구를 진행함에 있어 해당 특허기술에 대한 면밀한 검토를 통해 해당기술을 침해하지 않고 회피하여 기술개발이 이루어질 수 있도록 하여야 할 것임</li> </ul>					

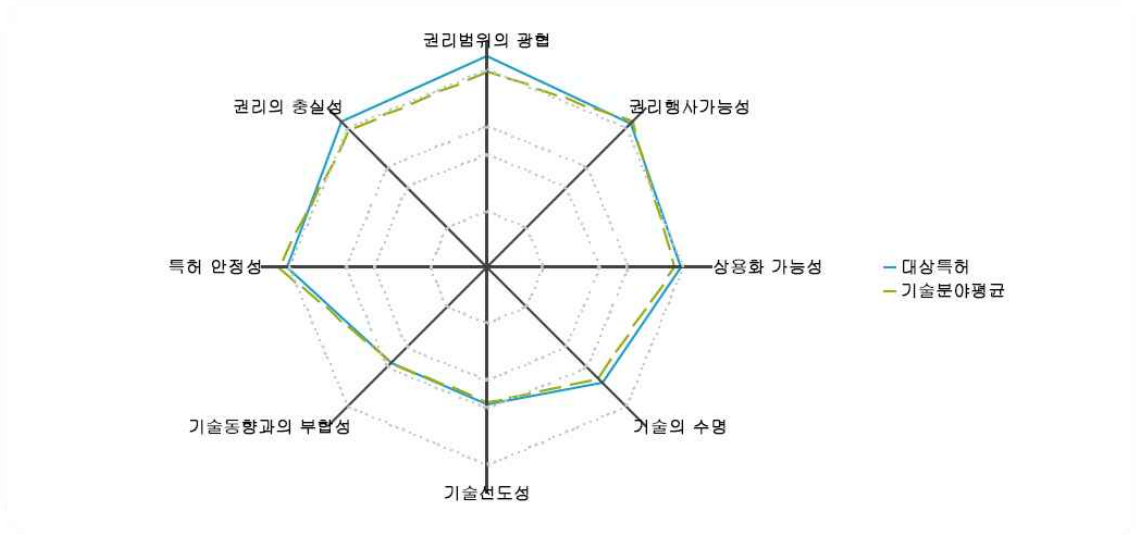
(8-2) 주요 핵심특허 심층 분석 (우수성 분석)

- 특허청 발명진흥회의 특허분석 평가시스템(SMART3)을 활용하여 피인용수가 가장 높은 미국 공개특허(US6216985B1)에 대해 상세 분석한 결과, 종합평가점수가 77점으로 AA로 우수한 기술로 평가됨.

**세부내용**

- 전체 미국 등록특허 중 상위 4.5%에 위치하는 우수 특허로 피인용수가 높고 독립 청구항이 많아 권리범위가 넓고 세밀하게 잘 작성되었음
- 세부적으로 살펴보면, 권리성 29.7점, 기술성 16.9점, 활용성 30.4점으로 기계분야 평균인 권리성 24.7점, 기술성 15.4점, 활용성 29.9점보다 모두 높게 평가되었음

평가지표	점수	등급	대분류(기계)			중분류(기계)			소분류(운송)		
			백분위(%)	평균	표준편차	백분위(%)	평균	표준편차	백분위(%)	평균	표준편차
권리성 (40점)	29.7	AAA	3.5	24.7	2.6	3.0	24.6	2.6	2.4	24.6	2.5
기술성 (20점)	16.9	AA	7.1	15.4	0.9	6.6	15.4	0.9	6.4	15.4	0.9
활용성 (40점)	30.4	BBB	28.8	29.9	1.5	28.2	29.9	1.4	25.8	29.9	1.3
총점 (100점)	77	AA	4.5	69.9	4.0	3.7	69.9	3.8	2.7	69.7	3.6



※ 백분위(%) : 동일한 기술분야내에서 평가 점수별 순위에 대한 백분위 상의 위치

그림 2.1.28 핵심특허(US6216985B1) 평가결과

(9) 주요 출원인 심층 분석

(9-1) 주요 출원인 기술영역 분석을 통한 유사 경쟁기업 관계도 (TDA Cross-Correlation Map)

< 지표 설명 >

- TDA Cross-Correlation Map은 최다 출원인(한국철도기술연구원)이 출원한 특허와 기술영역(DWPI MANUAL CODE\*)이 유사한 특허를 출원한 기관을 상호 연결한 Map으로, 최다 출원인과 연구영역이 유사한 경쟁기업을 파악할 수 있음

※ DWPI MANUAL CODE(Derwent World Patents Index) : Thomson Innovation의 고유 특허 지표로서, IPC (국제 특허 분류)의 단점을 보완한 기술 분류 코드

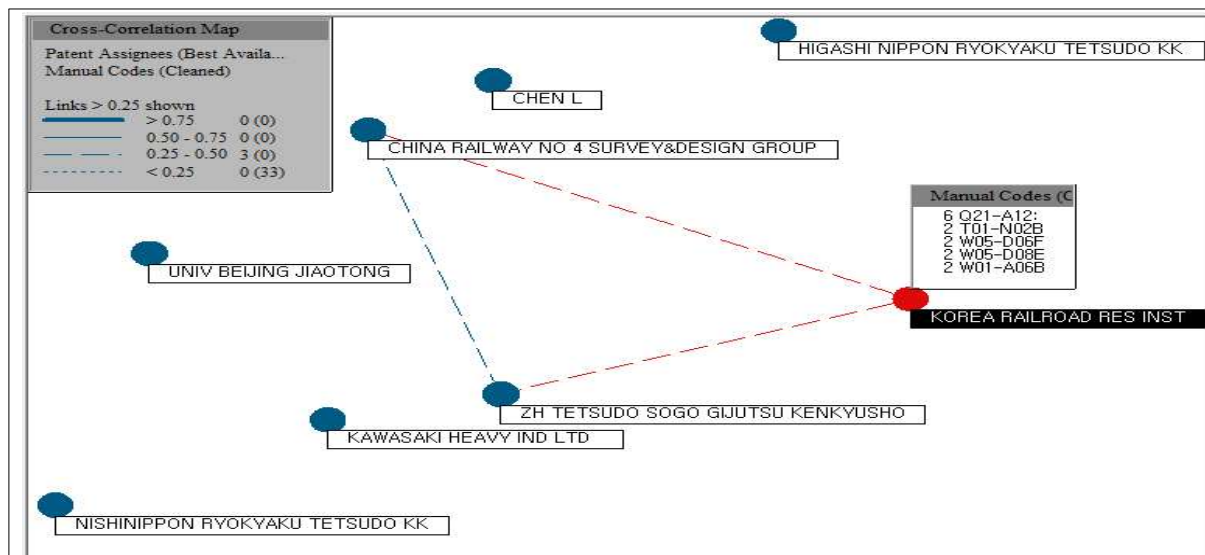


그림 2.1.29 TDA Cross-Correlation Map

○ TDA(Thomson Data Analyzer) Cross-Correlation Map을 통한 주요 출원인의 기술별 특허 출원 유사성을 살펴보면,

- 최다 출원인인 한국철도기술연구원은 Q21-A12(Railways-> Railway track arrangements/construction-> Bridges and tunnels), T01-N02B(Digital computers-> Internet and information transfer-> Communications and control-> Control-> Monitoring), W05-D06F(Alarms, signalling, telemetry and telecontrol-> Transmission systems for measurement or control signals-> Transmission medium-> Data network-based transmission), W05-D08E(Alarms, signalling, telemetry and telecontrol-> Transmission systems for measurement or control signals-> Function and mode-> Remote monitoring), W01-A06B(Telephone and data transmission systems-> Digital information transmission) 등 5개 기술 분야에 특허를 출원하고 있으며, 다 출원인인 한국철도기술연구원 기술과 유사 연구를 하는 경쟁기업으로는, ZH TETSUDO SOGO GIJUTSU KENKYUSHO, CHINA RAILWAY NO 4 SURVEY&DESIGN GROUP 등이 있음.

(9-2) 주요 출원인 상호인용 분석을 통한 기술분야/업계 핵심특허 도출(TDA Aduna Map)

< 지표 설명 >

- TDA Aduna Map은 주요 출원인의 핵심특허 및 기술분야 관계를 파악할 수 있는 Map으로, Citing Patent First Assignee (cleaned)\*를 기준으로 작성함

※ 주1) Citing Patent First Assignee (cleaned): Thomson Data Analyzer의 고유 특허 지표로서, 개별 특허에 대한 Cluster Relevance 관계를 통해서 경쟁기업간 핵심특허를 파악하는 지표임

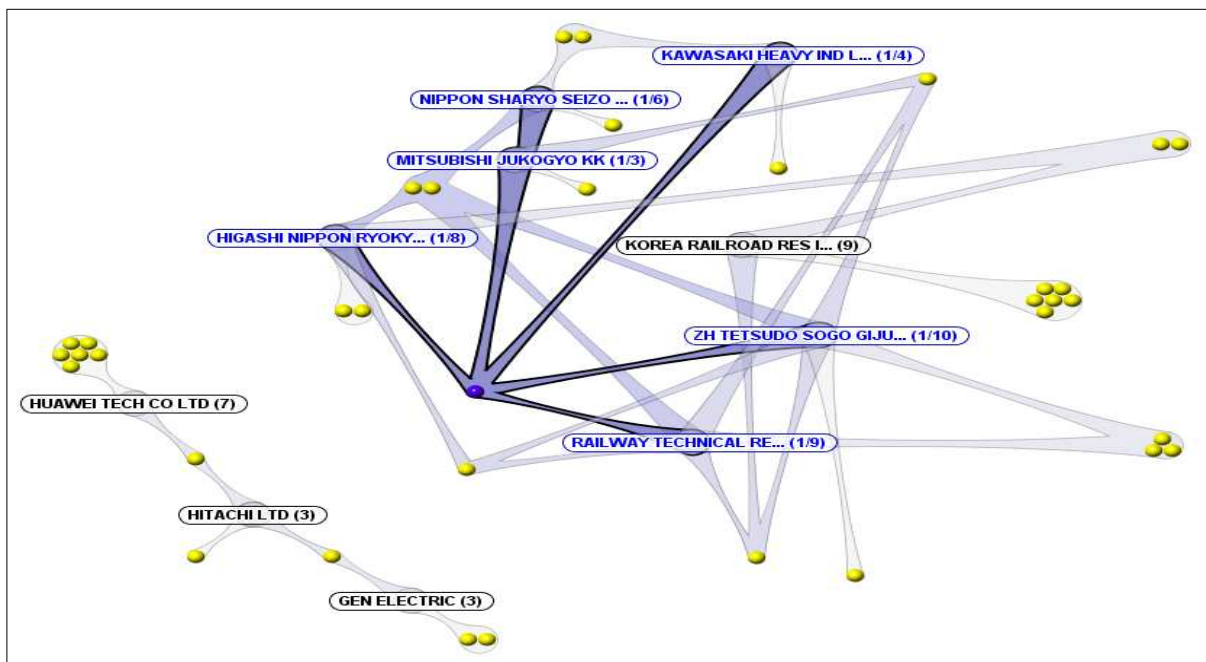


그림 2.1.30 TDA Aduna Map

○ TDA(Thomson Data Analyzer) Aduna Map을 통해 주요 출원인의 상호분석을 통해 핵심특허(기술분야, 업계)를 살펴보면,

- WEST JAPAN RAILWAY CO의 핵심 특허 기술인 일본특허(공개번호 JP1993267701A)인 “SHAPE OF TOP OF ROLLING STOCK HEAD VEHICLE” 기술은 공기 저항을 저감하기 위해 철도차량의 차체구조의 형상 기술로서 KAWASAKI HEAVY IND, NIPPON SHARYO SEIZO, MITSUBISHI JUKOGYO, HIGASHI NIPPON RYOKYAKU TETSUDO KK, ZH TETSUDO SOGO GIJUTSU KENKYUSHO, RAILWAY TECHNICAL RESEARCH INSTITUTE 등 6개 기관에 가장 많은 기술 영향을 미치고 있어 핵심기술로 파악할 수 있음.
- 또한, HIGASHI NIPPON RYOKYAKU TETSUDO KK의 핵심 특허기술인 일본 특허(공개번호 JP2005155129A) “Shock absorbing structure for tunnel,

includes pipe sections which are protruded to outside from hood section” 기술은 터널공사시 충격흡수 구조기술로서 다출원 기관들인 한국철도기술연구원, 일본의 RTRI(Railway Technology Research Institute) 및 ZH TETSUDO SOGO GIJUTSU KENKYUSHO 에 많은 기술영향을 주고 있어 주요 세부핵심기술로 파악할 수 있음.

(10) 특허 출원 동향을 통한 집중/공백분야 등 전망

(10-1) 특허출원 기술분야별 집중/공백분야 전망

< 지표 설명 >

- TDA Co-occurrence matrix는 모든 특허(231건)의 기술영역(DWPI MANUAL CODE)을 Matrix\* 형태로 분석한 것으로, 특허 출원이 많은 기술영역(집중기술)과 적은 기술영역(공백기술)의 분석이 가능함
- ※ Matrix 분석 : x축과 y축에 기술영역(DWPI MANUAL CODE)을 두고, 상호 연관된 특허건수를 도출함으로써, 출원이 많은 영역과 적은 영역의 분석이 가능

Reset	Manual Codes (Cleaned)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	# Records	30	25	23	18	15	15	15	14	14	12	11	10	10	10	10	8	8	7	7	6
	Manual Codes (Cleaned)																				
	# Records																				
1	W01-A06C4: Telephone and data transmissi	30	10	3		9	7	3	6	7	4	8	7	4	4	3	4	2		4	1
2	T01-C03C: Digital computers -> Input/outpu	10	25	3		6	6	2	4	5	4	5	4	3	3	3	5	1	1	4	2
3	X23-A05: Electric railways and signalling -	3	3	23		1	5	4	4	5	4	2	1	1	1	2			5	3	1
4	Q21-A12: Railways -> Railway track arra			18																	
5	W01-A06B5A: Telephone and data transm	9	6	1		15	9	1	2	7	4	9	2	2	2	1	4	1			2
6	W05-D08E: Alarms, signalling, telemetry a	7	6	5		9	15	4	4	11	6	10	3	2	2	1	4	1	1	2	1
7	X23-B04E: Electric railways and signalling	3	2	4		1	4	15	4	4	4	3	2	2	2	1	2	2	3		1
8	T01-J07D1: Digital computers -> Data proc	6	4	4		2	4	4	14	3	2	2	2			3	2	2		2	2
9	W05-D07D: Alarms, signalling, telemetry a	7	5	5		7	11	4	3	14	6	8	4	2	2	2	3	1	1	2	1
10	T01-N02B2B: Digital computers -> Internet	4	4	4		4	6	4	2	6	12	4	3	3	3	1	4	2	1	1	2
11	W05-D06F: Alarms, signalling, telemetry a	8	5	2		9	10	3	2	8	4	11	3	2	2	1	4		1	2	
12	T01-N01D: Digital computers -> Internet an	7	4	1		2	3	2	2	4	3	3	10	3	3	2	3	1		2	3
13	W01-A03B: Telephone and data transmiss	4	3	1		2	2	2	2	2	3	2	3	10	10	1	2		1	2	1
14	W01-A06G2: Telephone and data transmiss	4	3	1		2	2	2	2	3	2	3	10	10	1	2			1	2	1
15	X23-B02C: Electric railways and signalling	3	3	2		1	1	1	3	2	1	1	2	1	1	10	1		1		2
16	W01-A06A: Telephone and data transmiss	4	5			4	4	2	2	3	4	4	3	2	2	1	8		1		1
17	X23-B05C: Electric railways and signalling	2	1			1	1	2	2	1	2		1				1	8			2
18	X23-A02G: Electric railways and signalling		1	5			1	3		1	1	1	1	1	1	1			7		1
19	X23-B: Electric railways and signalling ->	4	4	3		2	2		2	2	1	2	2	2	2		1		1	7	
20	T01-C07C3: Digital computers -> Input/outp	1	2	1			1	1	2	1	2		3	1	1	2	1	2			6

그림 2.1.31 TDA Co-occurrence matrix (DWPI MANUAL CODES 비교)

○ TDA(Thomson Data Analyzer) Co-occurrence matrix를 통한 기술 분포를 살펴보면, 특허가 많이 나타나는 곳(적색 박스 교차점)을 기술개발이 활발하게 이루어지는 집중기술 영역으로 볼 수 있으며, 빈칸으로 표시되는 곳을 공백기술 부분으로 판단할 수 있음.

- 이 중, 신호제어 및 측정을 위한 변환기기 (Transmission systems for measurement or control signals\_W05)분야와 관계가 많은 영역을 좀 더 세밀하게 살펴보면, 철도차량 신호기기 관련기술(W05-D07D)(적색 박스 표시)과 모니터링 기술(W05-D08E)(적색 박스 표시)관련 특허 11건이 상대적으로 연구가 가장 집중되는 영역으로 판단할 수 있음.
- 그 외의 공백분야 및 건수가 작은 분야는 상대적으로 연구가 부족한 분야로 볼 수 있음.

(10-2) 특허 출원인별 연계성 분석

< 지표 설명 >

TDA Cross-correlation matrix는 특허 다출원인 간 상관관계를 Matrix\* 형태로 나타낸 것으로, 출원건수가 많은 출원인 특허를 중심으로 상호 연계하여 개발되는 기술영역의 핵심기업을 제시하는 분석이 가능함

※ Matrix 분석 : x축과 y축에 특허 다출원인을 두고, 각 기술영역별 피어슨 상관계수 기재 (-1에 가까울수록 반비례, 1에 가까울수록 정비례 관계, 0은 상호 무관)

Reset	Patent Assignees (Best Available) (C)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	# Records	22	10	9	7	6	6	6	5	5	5	4	4	4	3	3
	▼ ▲ Show Values >= 0.00 and <= 1.00 Cross-Correlation Crossed With: Patent Assignees (Cleaned - No Individuals) # of Records Pearson's r															
	KOREA RAILROAD RES INST															
	ZH TETSUDO SOGO GIJUTSU KENKYU															
	HITACHI LTD															
	CHINA RAILWAY NO 4 SURVEY&DESIGN															
	HIGASHI NIPPON RYOKYAKU TETSUDO K															
	KAWASAKI HEAVY IND LTD															
	UNIV BEIJING JIAOTONG															
	CHEN L															
	NISHINIPPON RYOKYAKU TETSUDO KK															
	TOKAI RYOKYAKU TETSUDO KK															
	MITSUBISHI HEAVY IND LTD															
	NIPPON SHARYO SEIZO KK															
	UNIV SOUTHWEST CHINA JIAOTONG															
	FUJITSU LTD															
	KOBE STEEL LTD															
1	22 KOREA RAILROAD RES INST	0.000	-0.013	-0.010	-0.016	-0.016	-0.015	-0.010	-0.010	-0.022	-0.016	-0.024	-0.010	-0.012	-0.010	-0.014
2	10 ZH TETSUDO SOGO GIJUTSU KENKYUSH	-0.013	0.000	-0.009	-0.016	0.225	0.016	-0.009	-0.009	0.451	-0.015	0.059	-0.009	-0.011	-0.009	-0.013
3	9 HITACHI LTD	-0.010	-0.009	0.000	-0.011	-0.011	-0.010	-0.007	-0.007	-0.015	-0.011	-0.016	-0.007	-0.008	-0.007	-0.009
4	7 CHINA RAILWAY NO 4 SURVEY&DESIGN	-0.016	-0.016	-0.011	0.000	-0.019	-0.017	-0.011	-0.011	-0.025	-0.019	-0.028	-0.011	-0.014	-0.011	-0.016
5	6 HIGASHI NIPPON RYOKYAKU TETSUDO K	-0.016	0.225	-0.011	-0.019	0.000	0.544	-0.011	-0.011	0.024	0.083	-0.028	-0.011	-0.014	-0.011	-0.016
6	6 KAWASAKI HEAVY IND LTD	-0.015	0.016	-0.010	-0.017	0.544	0.000	-0.010	-0.010	-0.022	0.530	-0.025	-0.010	-0.012	-0.010	0.202
7	6 UNIV BEIJING JIAOTONG	-0.010	-0.009	-0.007	-0.011	-0.011	-0.010	0.000	-0.007	-0.015	-0.011	-0.016	-0.007	-0.008	-0.007	-0.009
8	5 CHEN L	-0.010	-0.009	-0.007	-0.011	-0.011	-0.010	-0.007	0.000	-0.015	-0.011	-0.016	-0.007	-0.008	-0.007	-0.009
9	5 NISHINIPPON RYOKYAKU TETSUDO KK	-0.022	0.451	-0.015	-0.025	0.024	-0.022	-0.015	-0.015	0.000	-0.024	0.766	-0.015	-0.018	-0.015	-0.021
10	5 TOKAI RYOKYAKU TETSUDO KK	-0.016	-0.015	-0.011	-0.019	0.083	0.530	-0.011	-0.011	-0.024	0.000	-0.027	-0.011	-0.013	-0.011	0.917
11	4 MITSUBISHI HEAVY IND LTD	-0.024	0.059	-0.016	-0.028	-0.028	-0.025	-0.016	-0.016	0.027	-0.027	0.000	-0.016	-0.020	-0.016	-0.023
12	4 NIPPON SHARYO SEIZO KK	-0.010	-0.009	-0.007	-0.011	-0.011	-0.010	-0.007	-0.007	-0.015	-0.011	-0.016	0.000	-0.008	-0.007	-0.009
13	4 UNIV SOUTHWEST CHINA JIAOTONG	-0.012	-0.011	-0.008	-0.014	-0.014	-0.012	-0.008	-0.008	-0.018	-0.013	-0.020	-0.008	0.000	-0.008	-0.011
14	3 FUJITSU LTD	-0.010	-0.009	-0.007	-0.011	-0.011	-0.010	-0.007	-0.007	-0.015	-0.011	-0.016	-0.007	-0.008	0.000	-0.009
15	3 KOBE STEEL LTD	-0.014	-0.013	-0.009	-0.016	-0.016	0.202	-0.009	-0.009	-0.021	0.917	-0.023	-0.009	-0.011	-0.009	0.000

그림 2.1.32 TDA Cross-correlation matrix

- TDA(Thomson Data Analyzer) Cross-correlation matrix를 통한 기술 분포를 살펴보면, 특허출원 건수(Records)가 많은 출원인 TOP 15 中, 상관관계가 0.5 이상으로 높은 기업은 상호 연계하여 핵심적으로 해당기술을 선도하는 기업영역으로 볼 수 있음.
- KOBE STEEL LTD와 TOKAI RYOKYAKU TETSUDO KK가 서로 상관관계가 0.917로 가장 높은 것으로 분석되며, 양사 간에 기술경쟁관계가 가장 밀접하게 연계됨을 판단할 수 있고 MITSUBISHI HEAVEY IND LTD와 NISHINIPPON RYOKYAKU TETSUDO KK가 상관관계 0.766으로 두 번째로 기술경쟁관계가 가장 밀접하게 연계됨을 파악할 수 있음.
- 향후 상호 연계성이 높은 분야를 고려하여, 핵심기업의 경쟁기술 관계를 파악할 필요가 있음.

#### 4. 분석결과에 따른 시사점

##### 가. 논문분석 결론

- 터널 미기압과 저감 후드 분야 논문 추이를 살펴보면, 1990년부터 현재까지 총 159건의 관련 논문이 발표되고 있으며, 일부 증감이 있지만 대체적으로 1990년대 후반부터 증가하는 추세를 나타내고 있어 최근 철도선진국을 중심으로 관심이 높아지고 있는 분야로 판단할 수 있음.
- 철도 터널 미기압과 기술(A기술) 분야의 논문이 많이 발표되고 있으며, 저널별로는 ACADEMIC PRESS LTD ELSEVIER SCIENCE LTD, PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD, LSEVIER SCI LTD, PROFESSIONAL ENGINEERING PUBLISHING LTD 등 유럽, 미국의 저널에서 많은 논문이 발표되고 있음.
- 국가별로 보면, 유럽의 기관에서 많이 발표(40%)되고 있으며, 한국도 약간의 논문 실적이 발표(8%)되고 있는 상황으로 관련 분야 연구 노력이 필요한 상황임.
- 이 분야에서는 Howe, MS 교수(미국 Boston Univ)가 21건으로 가장 많이 발표한 것으로 나타나고 있음. 이 분야 최다 연구기관은 미국 Boston Univ가 24건, 일본의 RTRI(Railway Technology Research Institute)가 8건의 논문을 발표하였으며, 미국 Boston Univ가 관련 분야 논문을 많이 발표하고 있어 해당분야를 선도하고 있음을 알 수 있음.

##### 나. 특허분석 결론

- 터널 미기압과 저감 후드 분야의 특허동향을 살펴보면, 1990년부터 현재까지 총 231건

의 관련 유효특허가 출원되고 있으며, 중국이 37%(85건)로 최다이며, 일본, 한국, 미국, 유럽의 순으로 출원되고 있음. 우리나라는 2006년 이후 출원 특허가 전체 특허의 60% 이상을 차지하는 등 최근 관련 분야 관심이 증가하고 있음이고 보여짐.

- 세부 기술별로 보면, 철도터널 미기압과 저감기술(A기술)과 원격 모니터링기술(B기술) 분야 특허가 50%씩 동일하게 나타나고 있음. 특허를 많이 출원한 상위 5 출원인(Top 5 Assignee)을 살펴 보면, 한국의 KRRI, 일본의 HITACHI, RTRI, 중국의 북경교통대 등이 많은 출원을 하고 있으며, 이 분야 다 출원인들은 일본의 HITACHI를 제외하고 대부분 자국 특허에 국한되어 출원한 것을 통해, 국제 기술 경쟁이 가속화하지는 않은 것으로 보여짐.
- 출원국가별 세부기술 특허분포를 살펴보면, 일본, 한국이 철도터널 미기압과 저감기술(A기술) 분야 특허가 많이 나타나고 있음. 원격 모니터링(B기술) 분야는 중국이 가장 많은 특허를 출원하고 있는 것으로 나타나고 있으며, 출원건수가 가장 많은 것을 볼 때 이 분야 강점을 보유하고 있는 것으로 보여짐.
- 지수 분석을 통해 국가별 경쟁력을 비교해보면, 해외 특허 시장확보력을 의미하는 시장 확보지수(PFI)는 해외 출원 Family Patent가 많은 유럽이 높게 나타나고 있으며, 원천/핵심 특허 보유와 관련이 높은 인용도지수(CPP) 및 영향력지수(PII) 및 양적 수준(특허건수)을 고려한 기술력지수(TS)에서는 미국이 가장 높은 경쟁력을 나타내고 있음. 이를 통해 볼 때, 향후 연구를 진행함에 있어 質적으로 가장 우수한 미국 특허를 중심으로 세부 선행기술을 분석하는 것이 필요할 것으로 판단됨.
- 한국의 경우 특허건수, 시장확보력, 인용도 등 기술영향력과 관계된 대부분의 지수에서 낮은 수준을 보이고 있어 향후 관련 분야 기술 확보가 시급히 요구되는 상황임.
- 해외 신흥시장(동남아, 아프리카 등)에서 원천기술의 특허출원이 필요함.
- 유효특허 231건에 대한 Text mining을 통해 핵심 연구영역을 살펴보면, Air/Hood/Inside, Section/Structure/Hole, Node/Network/Sensor 등의 Text가 특허 청구항 등에 많이 나타나고 있어, 해당 분야에 대한 기술 집중도가 높은 것으로 볼 수 있음. 특히 2014년에 출원된 최신 특허들을 보면 Device for accurately positioning railway locomotive, Real-time detection method for high-speed rail, Online monitoring track traffic axle temperature system 등 원격 모니터링(B기술)과 관련된 기술이 최근 추세임을 알 수 있음.

## 2절 국내외 시장현황 및 전망

### 1. 국외 시장 환경

- 2009년 말 EU에서는 ‘통합 기술지향의 사용자 지향적 지속가능형 미래 교통시스템’에 대한 의견을 각계로부터 취합한 바 있고, 지속가능한 미래교통의 목적을 교통이 환경에 미치는 영향의 개선, 안전성의 증대, 혼잡 감소, 화석연료 의존성 감소로 정의하였음. 이를 달성하기 위한 다음과 같은 기술개발 과제를 제시하였음.
  - 생애주기비용감소, 유연성 개선 및 열차의 공급력을 높이기 위한 철도구성품의 표준화 수준 증대
  - 철도시스템의 공급력 증대 방안 모색
    - 좀 더 에너지 효율적인 운전(자동운전포함)
    - 장대화 및 열차용량 증대
    - 안전을 해치지 않으면서 통행밀도를 높이기 위한 신호기술 개선
    - 속도 증대
    - 승차율 증대(적재율 증대)
  - 비용절감, 온실가스 감소, 공급력 증대, 선로훼손 감소, 선로사용료 인하를 가능하게 하는 차량의 경량화
    - 복합재 이용
  - 교통용량, 속도의 최적 사용, 에너지 절약 및 온실가스 감소를 가능하게 하는 Telematic 응용의 강화
    - 통합된 통행량관리시스템 개발
  - 국경통과 시간 감소를 위한 상호운영가능성 및 Telematics 응용의 증대
    - 사전 공지 및 표준화된 문서 사용 등
  - 환경영향감소를 위한 기술개발
    - 디젤 연료 대체
  - 전철화 증대
    - 에너지 효율성 증대 - 회생전력 제동(브레이킹), 차상 에너지 저장, 계측기의 사용 등
    - 녹색 디젤 기관차
  - 차륜(Wheelsets), 제동기(브레이크) 등 안전에 중요한 차량 구성품에 대한 유지보수 기법의 개발
    - 새로운 유지보수 기법의 개발
- 한편 EIM(European Rail Infrastructure Managers)의 견해에 따르면 고속화를 위해서는 신호통신제어시스템, European Train Control System(ETCS), 전기에너지, 재생에너지의 이용, Telematics를 활용한 Intelligent infrastructure, Intelligent trains등의 개발

이 필요함 하였고, 환경개선을 위한 연구로는 에너지 효율성 제고(연비개선), 온실가스 배출 감소, 소음저감 등이 필요함이고 하였음.

- 철도산업은 건설·운영·차량의 3부분으로 크게 구분할 수 있고, 건설과 관련된 2000년 세계 철도 인프라 시장의 규모는 다음과 같음.

표 2.2.1 2000년 세계 철도인프라 시장 규모

		서유럽	동유럽	북미	중남미	아시아	아프리카/중동	CIS	오세아니아	계	
										(백만 EUR)	(조원)
궤도	신규/개량	3,170	500	710	310	3,250	570	470	220	9,200	14.2
	유지/관리	5,450	1,760	7,600	610	5,380	820	2,680	430	24,730	38.1
전철화	신규/개량	1,000	400	170	60	970	170	230	40	3,040	4.7
	유지/관리	1,180	390	30	10	410	15	470	10	2,515	3.9
소계	신규/개량	4,170	900	880	370	4,220	740	700	260	12,240	18.9
	유지/관리	6,630	2,150	7,630	620	5,790	835	3,150	440	27,245	42.0
	계	10,800	3,050	8,510	990	10,010	1,575	3,850	700	39,485	60.9

- 철도 선진국으로 철도위주의 교통시스템을 확보하고 있는 서유럽은 신규/개량에서도 여전히 세계 철도 인프라 시장의 약 1/4을 점유하고 있으며, 최근 들어 중국을 위시한 아시아 지역의 성장이 두드러짐. 반면 노후 철도가 많은 동유럽과 북미, CIS 지역에서는 유지관리 시장규모가 철도 인프라 시장의 대부분을 차지하고 있으며, 향후 철도 건설 시장 전망은 다음과 같음.

표 2.2.2 향후 세계 철도시장 전망 (통일)

	서유럽	동유럽	북미	중남미	아시아	아프리카/중동	CIS	오세아니아	계	
									(백만 EUR)	(조원)
'14년까지	34,970	18,763	8,900	15,621	123,983	54,356	35,355	3,006.7	294,954.7	454.6
'15년 이후	182,471	29,132	309,172	33,499	101,786	25,915	70,155	3,289.3	755,419.3	1164.3
계	217,441	47,895	318,072	49,120	225,769	80,271	105,510	6,296	1,050,374	1618.9

- 2014년까지 단기적으로는 중국의 고속철도망 구축에 따라 아시아 시장 규모가 클 것으로 보이고, 2015년 이후에는 온실가스 규제와 미국 국내 산업의 시장 개편으로 북미지

역의 철도망 확충 사업이 철도건설 시장을 주도할 것으로 전망됨.

- 이를 토대로 세계 철도시장은 고속철도 중심으로 유럽과 아시아를 기반으로 지속적으로 시장이 성장할 것으로 예상할 수 있음. 향후 북미 시장의 규모가 급속히 커질 것으로 예상되며, 이 때 서유럽과 일본 등 선발주자 및 한국, 중국 등 후발 주자까지 북미 철도 시장 점유를 위한 치열한 경쟁이 예상됨.
- 궤도/교량/터널 등 구조물의 성능규정에 대한 세계적인 방향은 WTO(World Trade Organization)/TBT(Agreement on Technical Barriers to Trade)협정의 체결을 바탕으로 한 설계 지침류의 국제 표준화에 대응임.
  - 현재까지 토목과 건축에 관련된 대부분의 설계는 강제규정에 바탕을 둔 소위 “사양 설계법”에 바탕을 두고 있어 어떠한 구조물을 설계할 때는 구체적으로 명시한 코드나 시방서를 따라야 했지만, 최근 들어 토목과 건축분야에서 성능기반설계(Performance-Based Design, PBD)로의 전환이 시도되고 있음.
  - 성능기반설계는 합리적이고 측정가능한 지표에 바탕을 두고 요구성능의 확보를 도모하는 결과지향적인 접근법이라 할 수 있으며, 이미 철도선진국인 독일이나 일본에서는 성능설계를 철도에 적용하고 있으며 이러한 경향은 세계적 추세라 할 수 있음.
  - 이러한 국제적 경향을 따라가기 위하여 국내의 토목, 건축, 항만 등에서는 성능중심설계로의 전환이 이루어지고 있는 실정이지만 아직 철도, 특히 터널분야에서는 아직도 사양중심설계에 머물러 있음. 따라서 현재까지 사양중심의 설계를 하고 있는 국내 철도 터널분야에서도 이를 위한 기반구축이 필요함.

## 2. 국내 시장현황 및 전망

- 국내 터널 현황을 살펴보면, 철도터널은 1905년 경부선에서 최초로 시공되어 현재 전체 터널길이는 241km로서 전체 철도노선의 약 7.8%에 해당되고, 고속철도 터널은 전체 길이가 191km로서 전체 노선의 46%에 해당됨. (※ 출처 : 터널현황 및 일반계획, 2012.9, 한국도로공사)

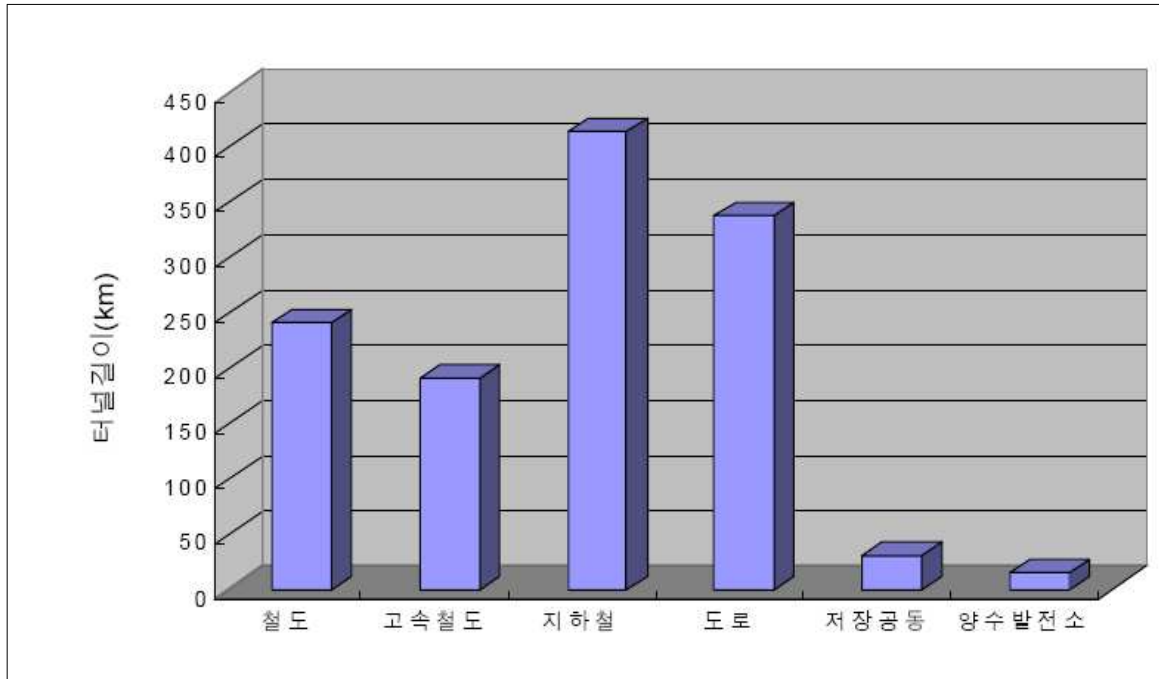


그림 2.2.1 국내 터널 현황 (철도산업정보센터 기술자료)

- 국내 도로터널 현황을 살펴보면, 2013년 12월말 기준 전국의 도로 터널수는 1,659개소로, 2003년말 603개소에 불과하던 것과 비교하여 1,056개소(175%)가 증가하였으며, 연장은 390km에서 1,208km로 818km(209%) 증가하였음. (※ 출처 : 도로교량 및 터널현황, 2013.12.31., 국토교통부 e-나라지표 <http://www.index.go.kr>)

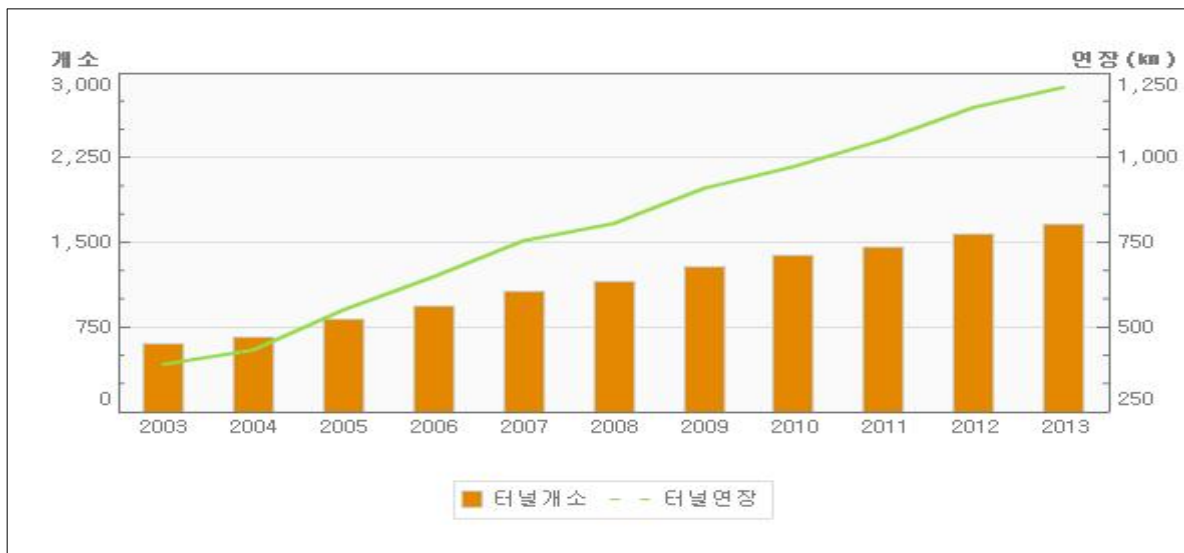


그림 2.2.2 전국 도로터널 현황 (<http://www.index.go.kr>)

- 국내 철도터널 개소 및 연장현황을 살펴보면, 기존선 최장터널로는 전라선 죽림온천 ~ 관촌간 슬치터널 6,128m (1999.5.18. 개통)이 있으며, 고속선 최장터널로는 경부고속선

대전 ~ 대구 황학터널 9,917m (2001.11.30. 개통)을 들 수 있음. (※ 출처 : 철도교량  
· 터널 · 옹벽 현황, 2009.12.31., 국토교통부 정책자료 <http://www.molit.go.kr>)

구분	계량		터널		옹벽		
	개소	연장(km)	개소	연장(km)	개소	연장(km)	
선별	경부선	488	35.994	61	26.260	623	116.779
	중앙선	272	21.519	101	51.594	792	69.975
	호남선	296	25.592	27	17.420	555	89.181
	전라선	219	23.271	44	38.832	364	44.565
	충북선	117	7.021	13	9.123	494	51.780
	경인선	21	2.084			80	19.904
	장항선	173	41.250	19	16.378	163	15.083
	영동선	157	6.716	89	21.422	573	51.434
	태백선	68	3.957	54	17.981	119	18.124
	동해선	107	7.543	10	2.212	264	31.989
	대구선	25	5.990			14	2.442
	경전선	174	11.484	39	13.943	631	70.396
	고속선	84	83.078	46	75.621	47	4.024
	연결선	23	6.124	5	1.628	1	0.770
	기타선	559	79.395	98	102.489	1,144	152.358
합계	2,783	355.018	606	394.903	5,924	738.804	

그림 2.2.4 전국 철도터널 현황 (<http://www.molit.go.kr>)

- 호남고속철도는 전체 터널의 총연장중 약63%가 2km 이상의 장대터널에 대한 연장이며, 수도권 광역철도 건설 또한 총 연장 168km중 147km가 터널 구간으로 대규모 장대터널이 굴착될 계획임. (※ 출처 : 호남고속철도 터널 개소 대비 터널 연장 비교, 2012, 한국철도시설공단)

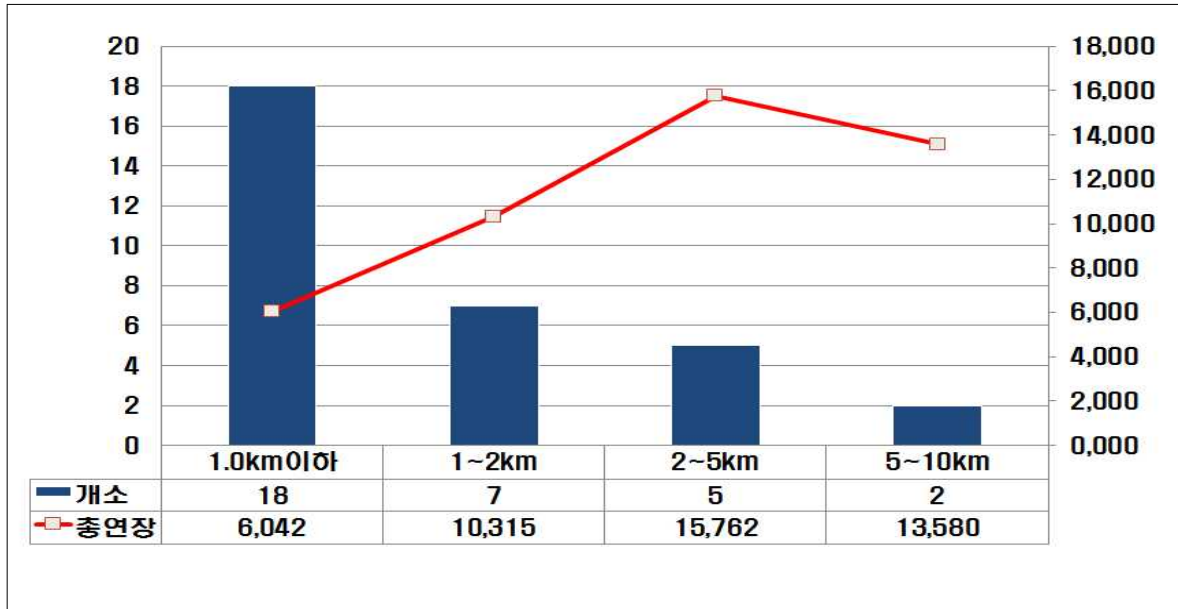


그림 2.2.5 호남 고속철도 터널 개소 대비 터널 연장 비교

○ 국내 고속철도에서 터널 출구 미기압과 저감대책이 필요한 경우는 콘크리트궤도를 적용한 준고속 노선의 터널로 개략 현황은 다음과 같음(코레일 - 중장기 운송전략, 2012.08).

- 도담-영천(중앙선), 동해선, 중부내륙철도, 서해선과 같이 최고운행속도 250km/h(일부 200km/h)에서 최적설계의 최소단면으로 터널 내공단면적을 설계하는 경우(단선터널 내공단면적 40m<sup>2</sup>, 복선터널 내공단면적 66m<sup>2</sup>~69m<sup>2</sup>) : 완공 예정 터널 수는 2024년까지 317개소로 추산되며, 이중 최소 터널 약 100개소 이상에 미기압과 후드가 필요할 것으로 예상됨.

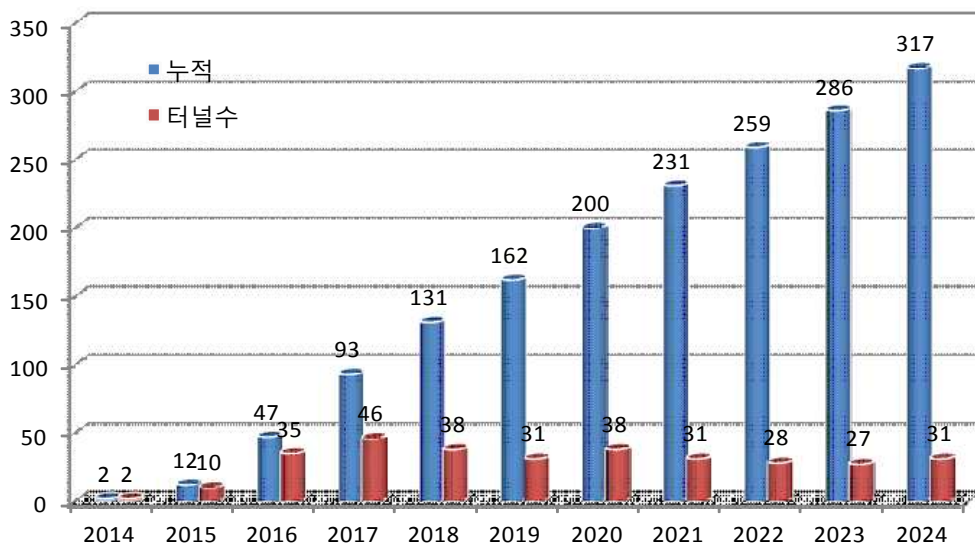


그림 2.2.6 연도별 준공터널 추이

- 현재 국내 업계의 기술동향 및 기술수준은 건설비 절감을 위한 터널단면적 최적설계에 치중하고 있으나, 미기압과 저감대책의 경우, 장대터널 및 250km/h급 터널에 대한 분석 및 평가기술이 부족하고, 평가기준이 정립되어 있지 않아 일본의 평가기준을 차용하여 적용하고 있음.
- 철도터널 단면적 확대 없이 터널 미기압과 문제의 해결이 가능한 터널갱구 후드 기술이 실용화되지 않아 현장적용에 문제가 있으며, 최적설치를 위한 상세도면, 기술시방서, 일관된 평가기법이 미비하여 실제적인 적용에 여러 문제점이 산적한 상태임.
- 따라서, 국내에 현재 설계중인 200km/h급과 250km/h급의 신규 고속철도의 터널이 100개소 이상이라 터널 미기압과 저감 대책이 필요하고, 고속철도 수출시 독자기술의 원천기술과 그의 실용화 실적이 필요함.

### 3. 해외 시장현황 및 전망

- 2010년~2020년까지 계획된 전세계 교통인프라 투자규모는 41조달러에 이를 것으로 보이며, 이 중 교통인프라(도로+철도)가 19%(7.8조달러)를 차지할 것으로 예측됨. 교통인프라 투자에 대한 지역별 현황을 살펴보면, 중남미시장과 중동시장에서 상대적으로 많은 투자가 예측됨. (※ 출처 : Strategic Insight on Global Rail Market, 2012.5, Frost & Sullivan)

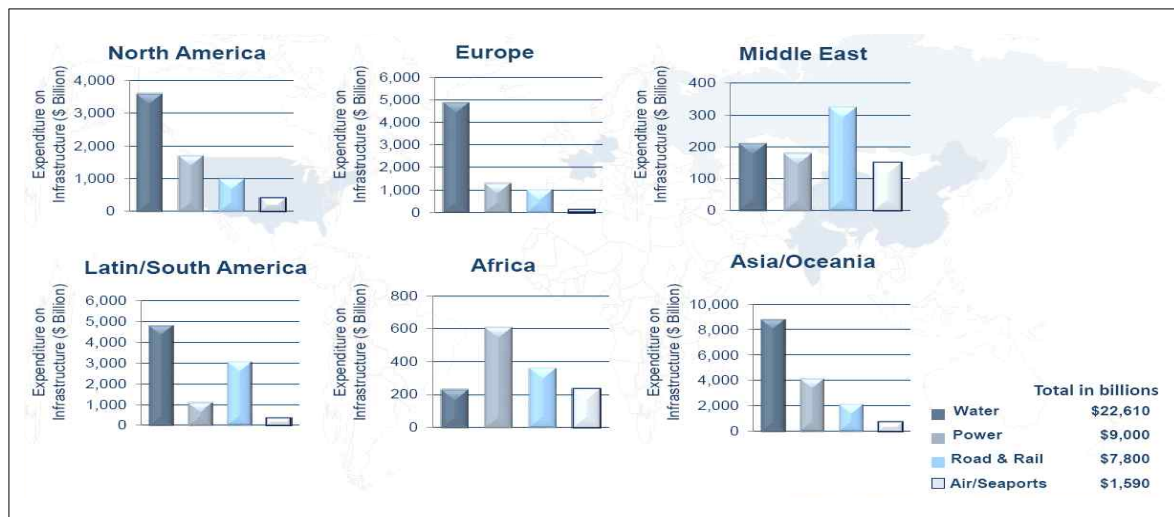
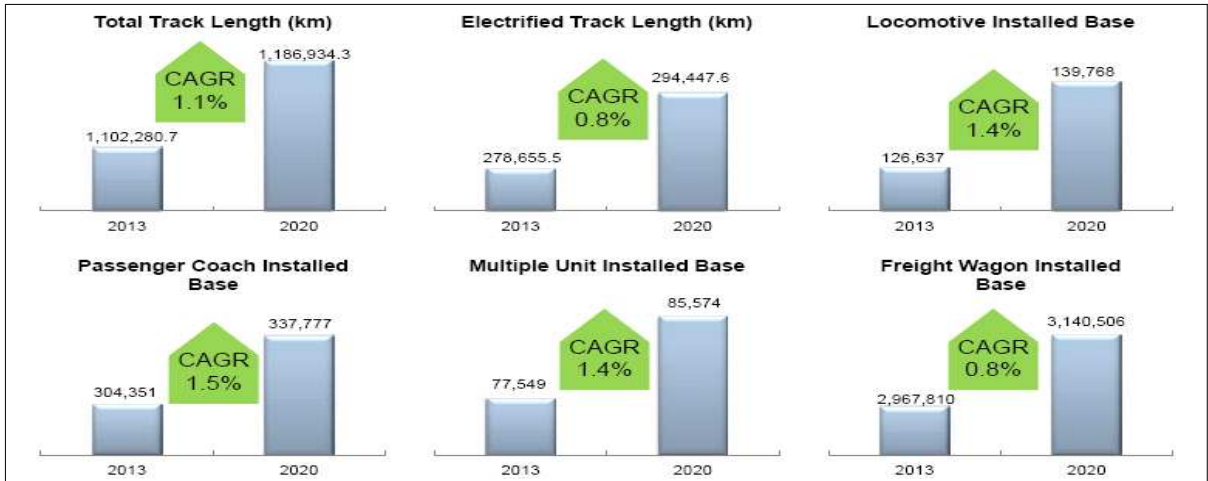


그림 2.2.7 2010~2020 글로벌 인프라 투자(지출) 현황

- 글로벌 철도인프라(철도연장, 전철화 선로)시장 중 철도 연장선은 2013년부터 2020년까지 연평균복합성장률(CAGR) 1.1% 증가하는 등 철도차량(기관차, 여객열차, 동차, 화차) 시장을 포함하여 2020년까지 계속해서 증가할 것으로 예측됨.(※ 출처 : Executive Analysis of the Global Rail Industry 2014, 2014.7, Frost & Sullivan)



2.2.8 Rail Market : Forecast Overview of Key Rail Parameters, Global, 2013 and 2020

- 2010년~2020년까지 계획된 철도 선로의 추가 구축계획을 살펴보면, 전 세계적으로는 0.2%증가하는 데 그칠 것으로 예측됨. 유럽은 기존의 선로활용을 극대화하는 데 주력할 것으로 예측되지만, 상대적으로 아시아 지역에서 선로 확대가 많이 나타날 것으로 예측됨.(※ 출처 : Strategic Insight on Global Rail Market, 2012.5, Frost & Sullivan)

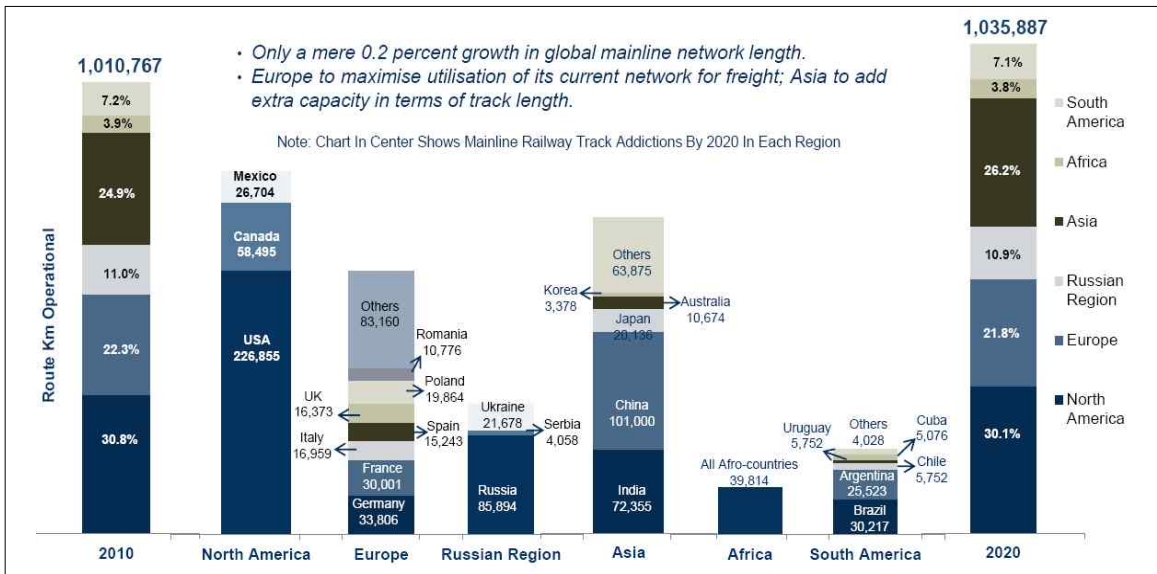


그림 2.2.9 2010~2020 글로벌 인프라 투자(지출) 현황

- 2011년~2020년까지 계획된 고속철도 인프라 투자에 대한 누적 시장규모를 살펴보면, 2011년 700억달러에서, 2020년 9,100억달러까지 크게 성장할 것으로 예측됨. 고속철도 시장은 철도산업에서 가장 큰 잠재력을 갖고 있는 사업분야이며, 중동과 북미가 가장 큰 신규 시장이 될 것으로 예측됨. (※ 출처 : Strategic Insight on Global Rail Market, 2012.5, Frost & Sullivan)

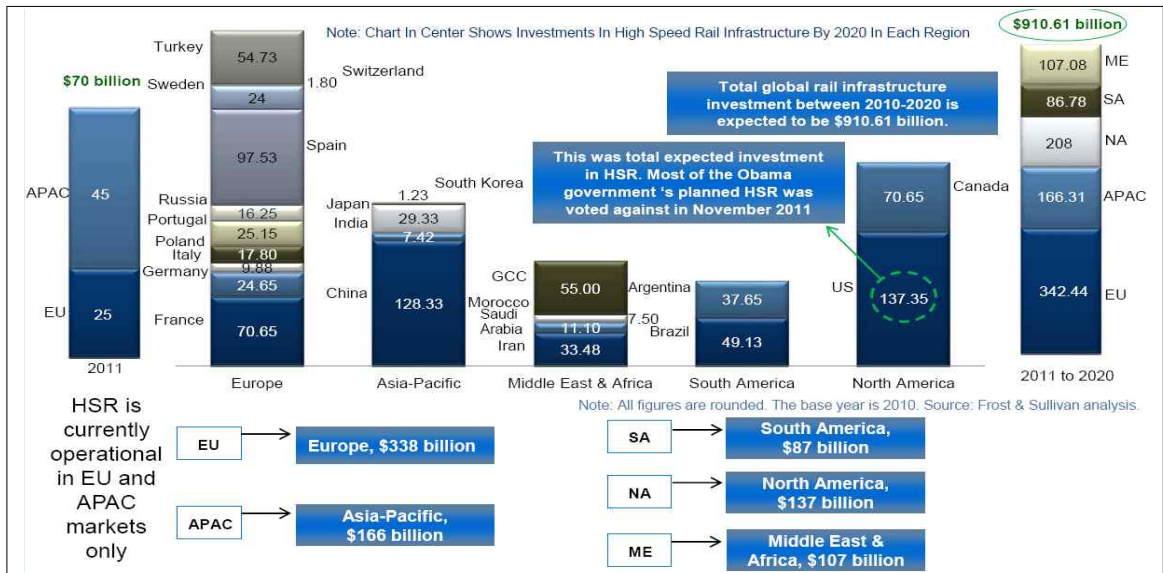


그림 2.2.10 2011~2020 고속철도 인프라 투자현황

- 2012년부터 2022년까지 세계 고속철도시설 연장선에 대한 연평균 성장률은 4.5%에 달할 것으로 전망됨. 또한 2025년까지 아시아와 유럽간 고속철도 연결 서비스 1단계 상업화가 기대되어 고속도로에서 철도로의 대규모 교통수단 전환이 예상됨.
  - 유럽의 경우 2025년까지 스페인에서부터 프랑스 및 터키에 이르는 거대 고속철도망이 구축될 것으로 기대되고, 아시아 태평양의 경우 인도는 중국 고속철도 다음으로 가장 큰 고속철도망 잠재성을 갖고 있지만 운영 및 펀딩 프로젝트 관련사유로 고속철도망 채택율은 여전히 불확실함. (\* 출처 : Rail Outlook Study 2013-2022, 2011.5, Frost & Sullivan)

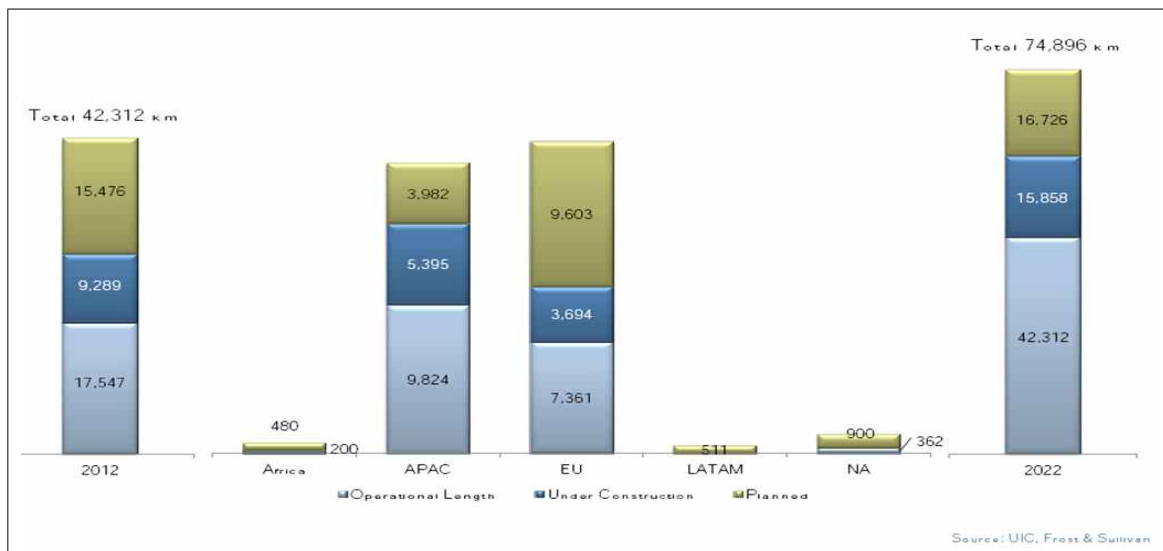


그림 2.2.11 2012-2020년 글로벌 고속철도망 인프라스트럭처 현황

가. 국외 터널 시장현황

- 산업조사 전문기관 IBIS World에 따르면, 미국의 교량 및 터널 건설산업의 시장 규모는 2013년을 기준으로 251억 달러에서 2015년 275억 달러로 증가할 것으로 예상됨. (※ 출처 : 미국, 교량·터널 건설산업 현황 및 진출 기회, 2013.09, KOTRA 해외비즈니스 정보 포털 Globalwindow)

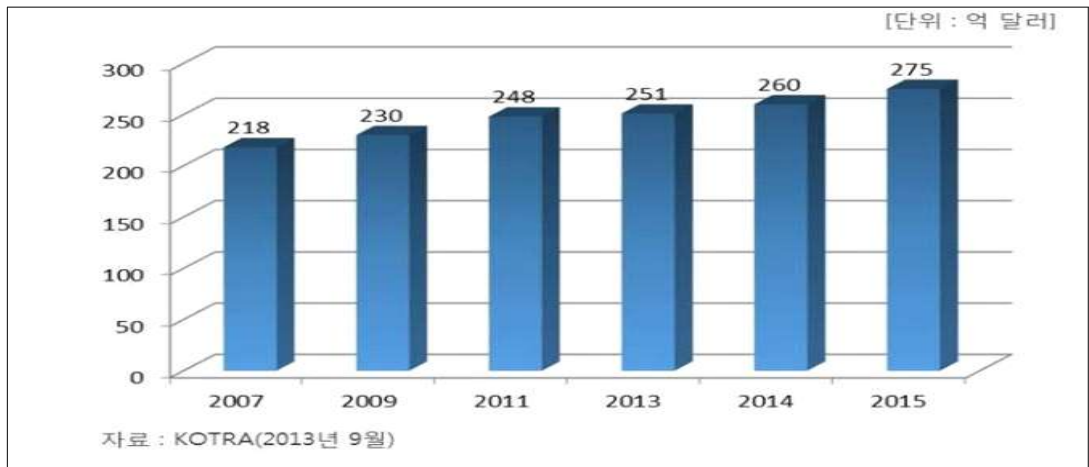


그림 2.2.12 미국 터널 및 교량 건설산업 시장규모

- 또한 미국의 교량 및 터널 건설산업의 시장은 분야별로는 신설되는 터널이 약 8.7%로 나타나고 노후된 교량 및 터널의 개보수는 전체 산업에서 24.7%를 차지함. 또한, 미국의 연방 및 주정부의 재정적자가 지속되며 2011년 가장 높은 하락세를 기록했으나, 점차 회복세로 접어들 것으로 전망되며 향후 5년간 평균 4.9%의 성장할 것으로 예상함. (※ 출처 : 미국, 교량·터널 건설산업 현황 및 진출 기회, 2013.09.22., KOTRA 해외비즈니스정보포털 Globalwindow)

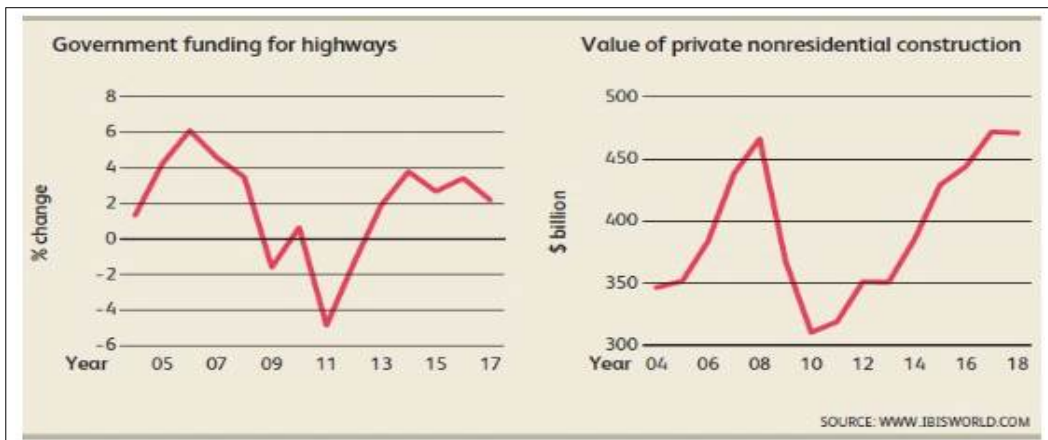


그림 2.2.13 미국 고속도로 건설 정부예산 및 비주택분야 건설시장 규모

- 세계시장은 중요국가인 중국과 유럽, 미국의 후드설치 시장규모를 향후 10년간 최소한 7,000억원 규모로 볼 수 있고, 본 미기압과 저감 기술로 인하여 터널단면적을 효율적으로 축소할 수 있기 때문에 즉, 터널건설비를 약 12% 절감할 수 있게 되므로 시장의 진입 가능성은 매우 높고, 특허권 기술이전을 통하여 시장을 개척할 수 있음.

나. 해외 철도터널 미기압과 저감 현황

- 2005년 이후 유럽과 일본, 중국, 대만 등의 신규 고속선 들이 발라스트 궤도에서 콘크리트 궤도로 바뀌고 개통됨에 따라 콘크리트 궤도의 공기역학적 특성 때문에 전부 터널 갱구에 미기압과 저감 후드를 설치하고 있음.



그림 2.2.14 국외의 터널입구 미기압과 저감 후드

- 터널내의 콘크리트 궤도를 적용한 일본, 중국, 독일, 대만 등에서는 터널 미기압과 저감 대책을 각 나라의 설계기준에 맞게 적용하고 있음.
- 일본의 경우 철도터널 미기압과 저감을 위해 터널입구 30m에서 50m에 걸쳐 후드를 설치하고, 열차 전두부(train noses) 형상 디자인을 개발하여 효율적으로 미기압과를 저감하고 있음. (※ 출처 : MICRO-PRESSURE WAVES, 2013.10.31., INS & RST Delivery Unit, RSSB )

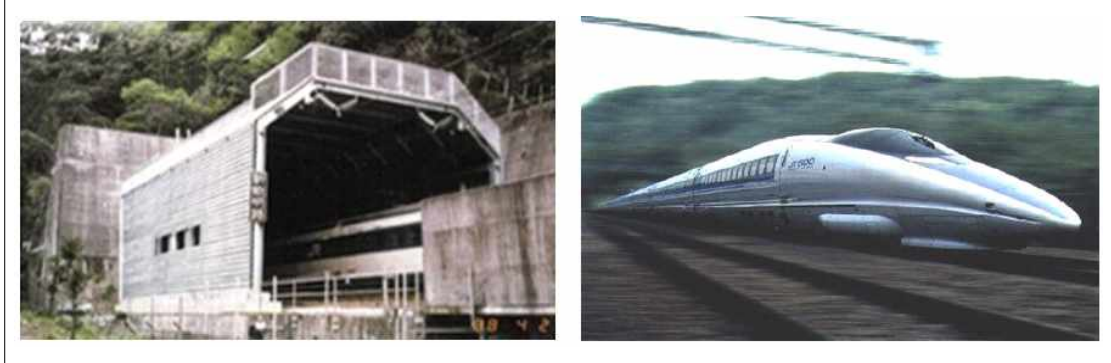


그림 2.2.15 일본의 터널입구 미기압과 저감 후드

- 독일 DB의 경우 카젠버그 터널(Katzenberg Tunnel) 입구 천장에 환기슬롯 포탈 돔 형태의 후드를 설치하여 터널에서 압력 증가와 함께 미기압파가 생성될 경우 최급구배(maximum gradient) 4km길이의 터널에서는 출구(exit portal) 미기압파 50%를 저감하고, 최급구배(maximum gradient) 10km길이의 터널에서는 출구(exit portal) 미기압파 80%를 저감함 (※ 출처 : MICRO-PRESSURE WAVES, 2013.10.31., INS & RST Delivery Unit, RSSB)

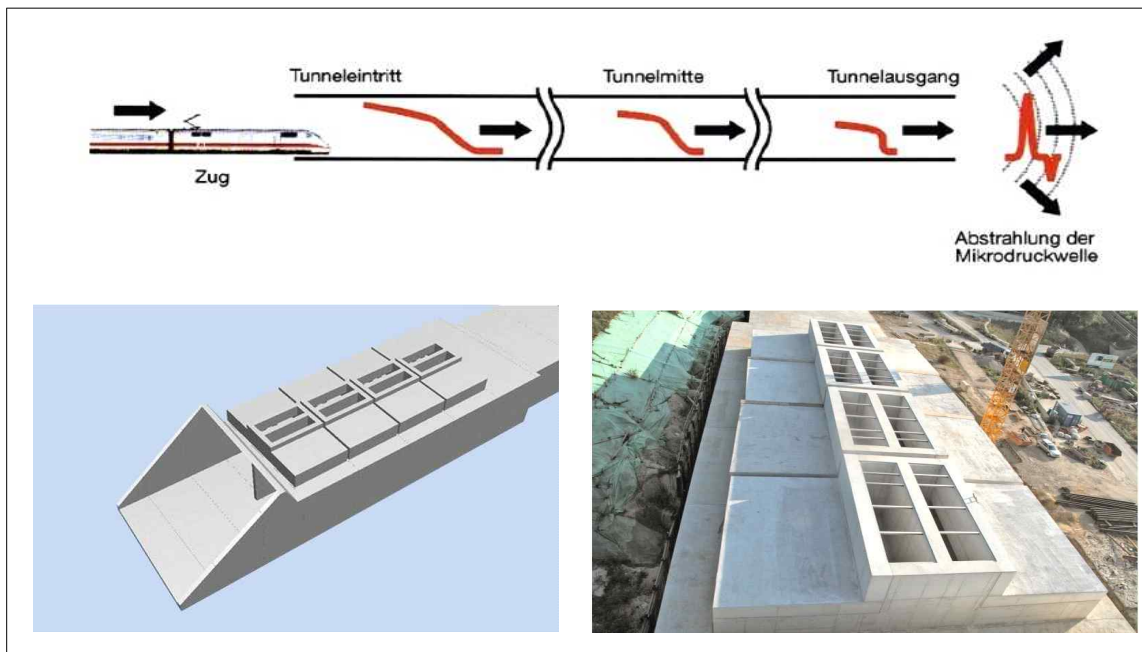


그림 2.2.16 독일의 터널입구 미기압과 저감 후드

#### 4. 분석결과에 따른 시사점

- 2010년~2020년까지 계획된 전세계 교통인프라 투자규모는 41조달러에 이를 것으로 보

이며, 이 중 교통인프라(도로+철도)가 19%(7.8조달러)를 차지할 것으로 예측됨. 교통 인프라 투자에 대한 지역별 현황을 살펴보면, 중남미시장과 중동시장에서 상대적으로 많은 투자가 예측됨.

- 2011년~2020년까지 계획된 고속철도 인프라 투자에 대한 누적 시장규모를 살펴보면, 2011년 700억달러에서, 2020년 9,100억달러까지 크게 성장할 것으로 예측됨. 고속철도 시장은 철도산업에서 가장 큰 잠재력을 갖고 있는 사업분야이며, 중동과 북미가 가장 큰 신규 시장이 될 것으로 예측됨.
- 산업조사 전문기관 IBIS World에 따르면, 미국의 교량 및 터널 건설산업의 시장 규모는 2013년을 기준으로 251억 달러에서 2015년 275억 달러로 증가할 것으로 예상됨.
- 국내 터널 현황을 살펴보면, 철도터널은 1905년 경부선에서 최초로 시공되어 현재 전체 터널길이는 241km로서 전체 철도노선의 약 7.8%에 해당되고, 고속철도 터널은 전체 길이가 191km로서 전체 노선의 46%에 해당됨.
- 2005년 이후 유럽과 일본, 중국, 대만 등의 신규 고속선 들이 발라스트 궤도에서 콘크리트 궤도로 바뀌고 개통됨에 따라 콘크리트 도상의 공기 역학적 특성 때문에 전부 터널갱구에 미기압과 저감 후드를 설치하고 있음.
- 일본의 경우 철도터널 미기압과 저감을 위해 터널입구 30m에서 50m에 걸쳐 후드를 설치하고, 열차 전두부(train noses) 형상 디자인을 개발하여 효율적으로 미기압과를 저감하고 있음.
- 독일 DB의 경우 카젠버그 터널(Katzenberg Tunnel) 입구 천장에 환기슬롯 포탈 돔 형태의 후드를 설치하여 터널에서 압력 증가와 함께 미기압과가 생성될 경우 최급구배(maximum gradient) 4km길이의 터널에서는 출구(exit portal) 미기압과 50%를 저감하고, 최급구배(maximum gradient) 10km길이의 터널에서는 출구(exit portal) 미기압과 80%를 저감함.

### 3절 국내외 정책동향

#### 1. 정책동향

- 국토해양부는 철도산업의 경쟁력을 높이고 발전기반을 조성함으로써 철도산업의 효율성과 공익성 향상을 위해 ‘철도산업발전기본법’ 개정하였으며, 철도기술 개발 계획분야에서의 비전을 “철도산업 경쟁력 강화를 위한 철도기술 선진화”로 정함.
- 국토해양부에서는 2011년 1월 19일 국가통합교통체계효율화법 제4조 제5항의 규정에 의하여 국가기간교통망계획(2001~2020) 제2차 수정계획을 확정 고시하였음. 국가기간 교통망계획에 따르면 철도분야에서는 X자형과 □자형의 국가 철도망을 구축할 계획으로

현재 건설·운영 중인 노선은 230km/h급으로 고속화, 계획·설계 중인 노선은 250km/h급으로 고속화 하는 간선철도 고속화를 통한 철도기능 효율화 관련 내용을 주요 내용으로 고시하였음.

○ 국가철도망계획의 국가철도망 구축계획을 살펴보면

- 경부·호남 고속철도 : 적기 완공(333km)
  - ✓ (경부) 대전·대구 도심구간(41km) '14년 완공
  - ✓ (호남) 오송~광주 구간(182km)은 '14년까지, 광주~목포 구간(49km)은 '17년까지 완공 추진
- 수도권 강남 수서~평택 노선(61km)은 '14년까지 건설
- 광주~목포 노선은 호남고속철도 기본계획 변경을 통해 기존 노선을 고속화하는 방안(함평~무안 직결선 포함)으로 추진
- 건설·운영 중인 노선 : 최고 230km/h급으로 고속화
- 선로 직선화, 신호시스템, 전철화 등 일부 시설 개량을 통해 선형조건에 따라 180km~230km/h까지 고속화
  - ✓ 건설비의 5%(1.2조원) 추가
  - ✓ 경춘, 전라, 중앙, 장항, 동해, 경전, 서해선, 공항철도 등
  - ✓ 설계중인 성남~충주 구간은 KTX 운행 고속화 타당성 여부 검토
- 기존선과 고속선을 연결, KTX 서비스를 전국으로 확대
  - ✓ 경부선 연계 : 포항, 진주, 마산, 수원
  - ✓ 전라선 연계 : 전주, 순천, 여수
  - ✓ 인천공항철도 : 인천시, 인천공항
- 계획·설계중인 노선 : 250km/h급으로 고속화
- (동서축) 원주~강릉 노선 건설(111km)
  - ✓ 원주~강릉 노선은 150→230km/h 급으로 고속화시 사업비 12% 증가
  - ✓ 춘천~속초 구간(92km)은 민간투자자와 연계
- (내륙축) 중앙선 원주~신경주 노선 건설(212km)
- (수도권 연결) 서울~원주 구간(90km)은 건설 중인 노선 활용
  - ✓ 고속화를 위한 수서~용문 구간(44km)은 별도 구축방안 검토
- 남북·대륙철도, 해저터널 등 국제철도 시대에 대비



그림 2.3.1 국가철도망계획(2011~2020)

○ 국가기간교통망계획 2차 수정계획에 따르면, 교통 분야에서 철도의 수송 분담률이 도로에 비해 크게 증가하는 구조 변화가 예상됨. 즉, 그림 2.3.2에서 알 수 있듯이 여객의 경우 2008년 15.9%에서 2020년 27.3%, 화물의 경우 2008년 8.1%에서 18.5%로 급격히 증가함. 또한 녹색성장위원회의 교통 SOC 투자비율 조정계획에 따르면 2009년 29.3%의 투자비율을 2020년에는 50%대까지 확대할 방침이며 이에 따라 도로 신규투자를 억제하는 대신 운영효율화에 주력하고자 하는 계획을 발표하였음.

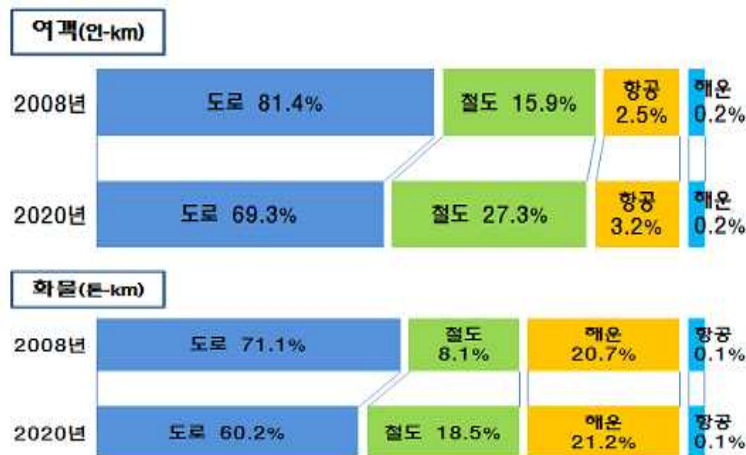


그림 2.3.2 수송 분담 구조 변화(자료 : 국토해양부)

- 2010. 9. 1. 미래녹색국토 구현을 위한 KTX 고속철도망 구축전략회의에서 KTX 고속철도망을 통해 국토를 통합·다핵·개방형 구조로의 재편 비전을 선포하였으며 그 내용으로는
  - 사업비 절감을 위하여 기존 선을 최대한 활용하며 신선은 단계적 건설, 전 구간 우선 용지보상 후 일괄시공, 사업비 절감형 설계기준 마련, 첨단 건설기술을 확보하여 공기단축 및 사업비 절감을 도모함
    - ※ 현재 예상하는 투자소요는 134조원이며 이를 97조원(72%수준)으로 축소하며 국고규모도 124조원에서 59조원 수준으로 대폭절감 목표
  
- 미래 녹색국토 구현을 위한 KTX 고속철도망 구축전략 보고회의(2010.9.1. 대통령 브리핑, 국토해양부, 국가경쟁력강화위원회, 미래기획위원회)
  - 기존 경부, 호남 고속철도(333km) 적기 완공
  - 건설 또는 운영 중인 노선을 최고 230km/h급으로 고속화 방침
  - 경춘, 전라, 중앙, 장항, 동해, 경전, 서해, 공항철도 등
  - 설계중인 성남 ~ 충주 구간은 KTX 운영을 위한 고속화 타당성 여부 검토
  - 계획, 설계중인 노선을 250km/h급으로 고속화
  - 동서축 : 원주~강릉 노선 건설(111km), 춘천~속초 구간(92km)
  - 내륙축 : 원주~신경주 노선 건설(212km), 대전, 김천~거제 구간(200km)
  - 수도권연결 : 서울~원주 구간(90km)은 건설 중인 노선활용, 수서~용문 구간(44km)
  - 중점고려사항 : 시간단축, 수요창출, 사업비 절감
  - 사업비 절감 : 기존노선 최대 활용, 신공법 도입
  
- 국가기간교통망계획(2001~2020) 수정 계획 확정 고시(2011년 1월 19일)(국가통합교통체계효율화법 제4조 제5항 규정에 의함)
  - X자형과 □자형의 국가 철도망 구축 계획
  - 건설 또는 운영 중인 노선을 180km/h~230km/h로 증속 방침
  - 간선철도 고속화를 통한 철도기능 효율화를 목표로 함
  
- 정부의 교통 SOC 투자 계획
  - 도로 신규철도투자를 현재 29%에서 50%(\* 20년)까지 확대
  - 투자 억제, 운영효율화에 주력
  - 사업타당성 평가 시, 녹색가치 반영
  - 철도연장 3,378km => 5,497km(+2,119km)

## 2. 국내외 관련법규 및 평가방법 동향

가. 국내 터널 미기압과 관련 적용기준

(1) 터널 미기압과 관련 적용기준과 관련근거 검토

표 2.3.1 고속철도 보유국의 터널 미기압과 관련 적용기준

구분	노선	적용기준	관련근거
일본	신칸센	· 터널 출구 20m 지점에서 50Pa 이하 · 민가 근방 (보안물건)에서 20Pa 이하	- 일본 산악터널 설계시공표준(2008.04)
독일	ICE	· 터널 출구 50m 지점에서 20Pa 이하	- Micro-pressure waves Korea For DB International(2007.08)
프랑스 중국 대만	200km/h이상 고속철도	· 터널 출구 20m 지점에서 50Pa 이하 · 민가 근방 (보안물건)에서 20Pa 이하	- 일본 산악터널 설계시공표준(2008.04)
대한민국	호남 고속철도	· 민가 근방 (보안물건)에서 20Pa 이하	- 호남고속철도 노반 실시설계 보고서
	수서~평택 고속철도	· 터널 출구 20m 지점에서 50Pa 이하	- 수서~평택 고속철도 “궤도중심간격 및 터널 단면적 검토 Report”
	원주~강릉 철도건설	· 민가 근방 (보안물건)에서 20Pa 이하	- 원주~강릉 철도건설 제1공구 노반 실시설계 “3편 - 제6장터널설계”
	중앙선 도담-영천 복선전철	· 터널 출구 20m 지점에서 50Pa 이하 · 민가 근방 (보안물건)에서 20Pa 이하	- 중앙선 도담-영천 복선전철 노반 및 실시설계 터널구간 공기역학 검토보고서
<b>검토 결과</b>			
- 국내에 미기압과 허용기준이 없어서 노선에 따라 각각 다른 임시 기준을 만들어 적용하였으나, 선진국의 국제기준과 부합되지 않는 잘못된 허용기준을 사용하였음. 이에 터널 미기압과 허용기준이 시급히 필요함.			

(2) 철도설계기준 (2013. 12, 국토교통부)

표 2.3.2 철도설계기준 (2013. 12, 국토교통부)

수록 내용
제12장 터널 P12-13, ⑧ 내공단면 계획 시에는 열차의 고속주행에 의하여 터널 내에 발생하는 공기저항 및 공기압 변화와 차량 밀폐도, 승차감 및 미기압파의 영향 등을 고려해야 함.
<b>검토 결과</b>

- 부록이나 별표로 구체적인 미기압파 허용기준을 제공해야 할 것으로 판단됨

(3) 터널설계기준(2007, 건설교통부)

○ P. 19의 2.2.4 내공단면계획 시에는 다음 사항을 고려하여야 함. 2.2.4의 (9)번 항목에 구체적인 내용 수록

표 2.3.3 터널설계기준(2007, 건설교통부)

수록 내용
(9) 철도용 터널의 내공단면계획 시에는 열차의 고속주행에 의하여 터널 내에 발생하는 공기저항 및 공기압의 변화와 차체밀폐도, 승차감 및 미기압파의 영향을 고려하여야 함.
검토 결과
- 부록이나 별표로 구체적인 미기압파 허용기준을 제공해야 할 것으로 판단됨

(4) 철도설계 지침 및 편람(KR CODE 2012, 철도시설공단, 국토교통부)

○ KR C-12010, 터널계획 편(2012.12.5.)

표 2.3.4 KR C-12010, 터널계획 편(2012.12.5.)

수록 내용
2. 계획 2.2 터널의 기본계획 (3) 내공단면 계획 시에는 다음 사항을 고려하여 계획하여야 함. P.6, ⑧ 내공단면 계획 시에는 열차의 고속주행에 의하여 터널 내에 발생하는 공기저항 및 공기압 변화와 차량 밀폐도, 승차감 및 미기압파의 영향 등을 고려하여야 함.
검토 결과
- KR C-12150에서 “터널 미기압파의 허용기준”으로 구체적인 미기압파 허용기준을 제공해야 할 것으로 판단됨. - 또한 KR C-12150의 뒤에 “해설 1. 터널 미기압파 환경영향평가를 위한 현장시험 계측방법”과 “해설 2. 터널 미기압파 환경영향평가 해석프로그램의 신뢰도 검증방법”으로 자세한 특성해설과 초저주파 소음/진동 계측방법과 환경영향 평가방법을 설명해야할 것으로 판단됨.

○ KR C-12080, 갱구부 편(2013.9.16.)

표 2.3.5 KR C-12080, 갱구부 편(2013.9.16.)

수록 내용
4. 갱문 설계 P.4, (4) 터널에서 설계속도 고속화에 따라 주변지역에 공기압(미기압)의 영향이 우려되는 경우에는 이를 고려하여 갱문형식을 정하여야 함.
검토 결과
- 갱문에 후드 등의 미기압파 저감 구조물(돌출식 갱문형식)을 설계에 반영할 수 있도록 되어 있음

(5) 종합 검토결과

- 국내에 미기압과 허용기준이 없어서 노선에 따라 각각 다른 임시 기준을 만들어 적용하였으나, 선진국의 국제기준과 부합되지 않는 잘못된 허용기준을 사용하였음. 이에 터널 미기압과 허용기준이 시급히 필요함.
- 터널 미기압과 영향을 검토를 하도록 철도설계기준, 터널설계기준, 철도설계 지침 및 편람에 제시되어 있으나, 구체적인 미기압과 허용기준(규제치)를 표나 하위 별표에 제공하지 않고 있음. 따라서 이에 대한 구체적인 허용 규제치를 제공하여야 함.

나 . 국외의 터널 미기압과 허용기준 해설

(1) 국외의 터널 미기압과 허용기준 설계 적용사례

표 2.3.6 국외의 터널 미기압과 허용기준 설계 적용사례

구 분	노선	적용기준	관련근거
일 본	신칸센	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 터널 출구 20m 지점에서 50Pa 이하</li> <li>· 민가 근방 (보안물건)에서 20Pa 이하</li> </ul>	- 일본 산악터널 설계시공표준 (2008.04)
독 일	ICE	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 터널 출구 50m 지점에서 20Pa 이하</li> </ul>	- Micro-pressure waves Korea For DB International(2007.08)
프 랑 스 중 국 대 만	200km/h이상 고속철도	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 터널 출구 20m 지점에서 50Pa 이하</li> <li>· 민가 근방 (보안물건)에서 20Pa 이하</li> </ul>	- 일본 산악터널 설계시공표준 (2008.04)

## (2) 일본 터널 미기압과 허용기준(2008년 개정본) 해설

- 최적 터널단면적과 콘크리트궤도를 제일 먼저 적용한 일본 신칸센 철도에서 1975년 이후에 터널 미기압과 문제를 처음으로 파악하고, 저감대책에 대하여 그 동안 많은 연구가 수행되어, 현재 유럽과 중국 등을 포함하여 전 세계적으로 터널 미기압과 대책 기준은 일본 기준을 준용하고 있음. 일본은 미기압과 크기가 기준치를 넘을 경우에, 터널 입구 후드(완충공)을 설치하도록 권장하고 있음.
- 일본 신칸센의 미기압과 허용기준은 2007년도까지 터널 갱구중심에서 20m 지점에서 20Pa (120dB)이었는데 2008년도에 터널 갱구중심에서 20m 지점에서 50Pa (128dB)로 대폭 완화 되었음.
- 일본 신칸센의 미기압과 허용기준(2008년 개정)은 실제적으로 유럽과 중국에서 터널 미기압과 대책에 대한 국제기준으로 사용되고 있음.
- 허용기준 50Pa (128dB)은 사람이 견딜 수 있는 고통 한계 값이라, 더 완화하기는 어려움.

## (3) 독일 DB의 미기압과 허용기준 해설

- 독일 DB의 미기압과 허용기준은 터널갱구 중심에서 외부로 50m 거리에서 측정된 미기압과 피크 값이 20Pa(120dB) 이하로 정하고 있음.
- 실제 터널 미기압과 현장시험이나 역해석을 수행해 보면, 터널갱구 중심에서 20m 거리에서 약 50Pa(128dB에 해당)의 피크 값이 나타나면, 50m 거리에서는 약 20Pa의 피크 값이 도출됨. 즉, 일본기준이나 독일기준이 거의 같은 결과를 도출하게 됨.
- 독일 DB는 터널갱구 중심에서 외부로 50m 거리에서 측정된 미기압과 피크 값이 20Pa(120dB) 이상이면 미기압과 저감대책인 후드를 설치하도록 권장하고 있음.

## (4) 터널 미기압과 허용기준치의 해설

- 터널 미기압과 허용기준치의 해설
  - 충격성 소음 또는 진동으로 나타나는 미기압과의 음압레벨 50Pa은 128 dB(데시벨, decibel)에 해당되며, 유압드릴(착암기)의 소리를 바로 옆에서 듣는 상황과 비유되며 사람의 귀가 고통을 느끼기 시작하는 소리임.
  - 음압레벨 20Pa은 120dB에 해당되며, 공항 활주로 옆에서 747 여객기가 이륙하는 소리를 듣는 상황과 비유됨. 또한 음압레벨 20Pa이 초저주파 성분(0Hz ~ 100Hz)이 대부분으로 민가에 방사되면 창문이나 문짝을 심하게 흔들어 놓는 진동으로 나타남.

- 터널 미기압파는 100Hz 이하의 가청주파수 소리와 초저주파의 진동으로 구성되어 있기 때문에, 같은 음압의 실제 가청 주파수 소리와 비교 했을 때는 다소 작게 들리지만 심각한 진동을 동반함.

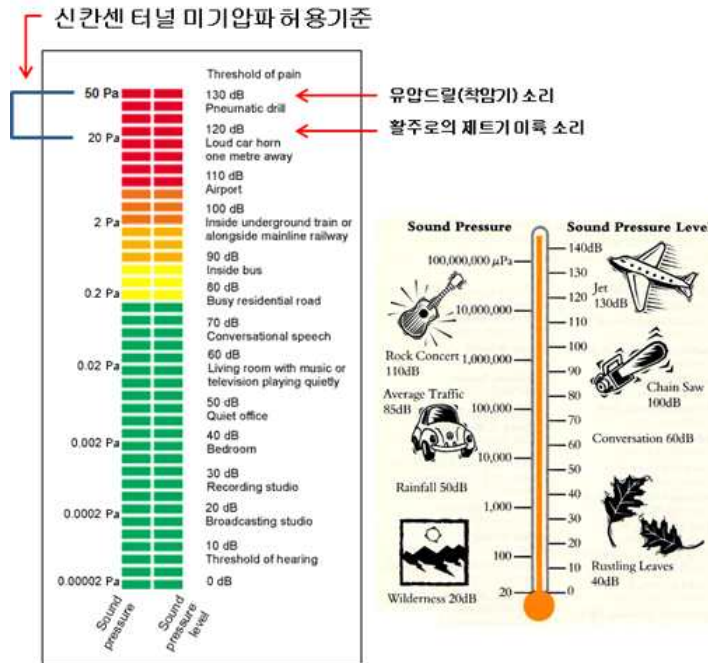


그림 2.3.3 데시벨과 음압의 관계와 소리의 크기

○ 터널 미기압파 폭발음의 현장시험 데이터 분석(일본 신칸센)

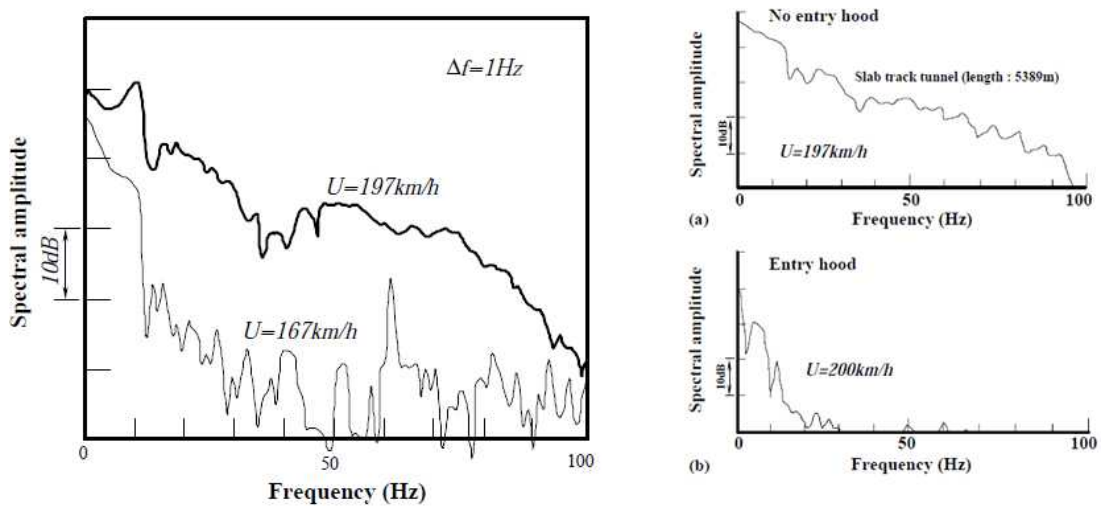


그림 2.3.4 터널 미기압파 주파수 분석: 초저주파 성분

- 터널 미기압파는 0Hz ~ 100Hz의 매우 낮은 저주파 성분의 소음/진동임

- 터널 미기압파는 0.2Hz 부근의 초저주파 영역에서 최대값을 나타내는 경향이 있음.

다. 터널 미기압파 환경영향평가를 위한 현장시험 계측방법

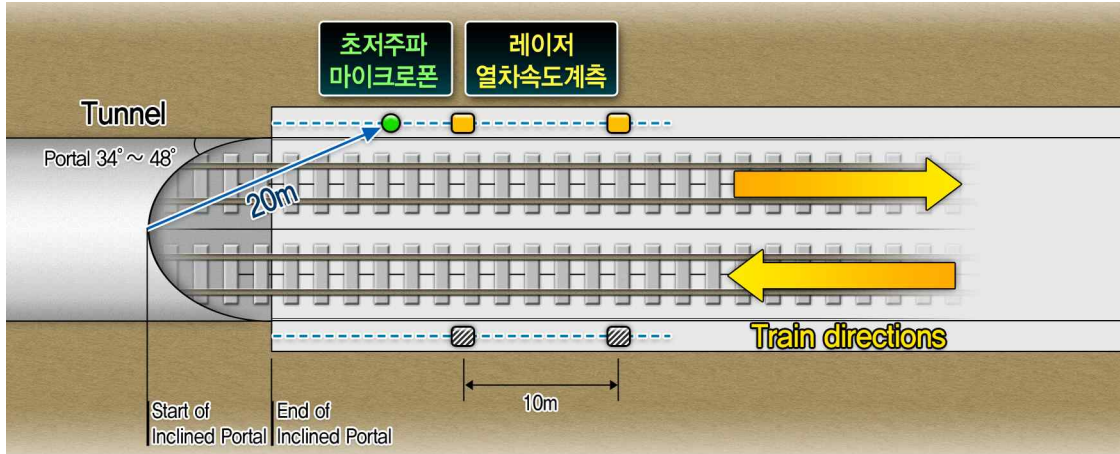


그림 2.3.5 터널 미기압파 계측 위치



그림 2.3.6 터널 미기압파 현장시험 사례(호남고속철도 회룡터널)

- (1) 상기 그림에서와 같이 터널 출구면 중심에서 20m 위치, 레일상면 1.2m 내외 위치에서 초저주파 마이크론이 터널 중심을 바라보게 설치함(단, 선로변 지장물로 인하여 20m 위치에서 미기압파 측정이 불가능할 경우에는 50m 위치, 레일상면 1.2m 내외 위치에 설치하여 미기압파가 20Pa 이하일 것).
- (2) 터널 미기압파를 계측하기 위해서는 초저주파 영역에서 주파수 특성이 평탄한 초저주파 마이크론 또는 미세압력센서를 사용하여야 하는데 0Hz ~ 1,000Hz 또는 0.2Hz ~ 1,000Hz의 계측범위에서 주파수 특성이 평탄한 검증된 센서를 사용하여야 하며 이에 대한 이력을 보고서에 명시해야 함.
- (3) 일반 범용 저주파 마이크론이나 검증이 되지 않은 범용 압력센서는 초저주파를 계측하지 못하거나 매우 왜곡되게 작은 값으로 계측함.

- (4) 현장시험에 대한 인용이나 수행 보고서에서는 계측장비 및 장비의 데이터 취득 성능, 터널 진입속도 및 열차속도 계측방법, 열차 전두부 제원, 열차 첫 번째 차량의 최대 투영단면적, 열차/터널의 유효단면적비, 터널 갭문형상 및 제원, 터널 연장, 콘크리트/발라스트 궤도형식, 터널내 시설물(사갱, 수직갱 댐퍼의 통풍 유효단면적, 기재갱 사양 등), 터널갭문 도면에서 계측위치 상세, 터널출구 외부주변 지형환경에 대한 사진과 상세(개활지 또는 V-컷 사면 기울기), 계측 시의 대기압 및 온도 등의 날씨, 터널내 열차교행 여부에 대한 기록이 포함되어야 함.

라. 터널 미기압과 환경영향평가 해석프로그램의 신뢰도 검증방법

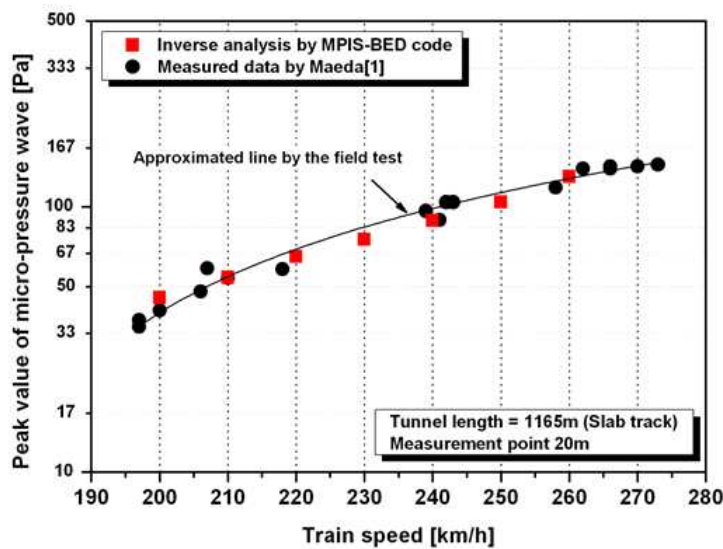


그림 2.3.7 터널 미기압과 환경영향평가 해석프로그램의 신뢰도 검증사례

- (1) 터널 미기압과 환경영향평가를 수행하기 위해서는 터널 미기압과 계측 전용 초저주파 마이크론 또는 미세압력센서로 국내외 터널 현장시험 계측 실험데이터로 검증된 해석프로그램을 사용하여야 하며, 적어도 고속열차 3개 이상 속도별로 3개 터널연장에 대하여 각각 미기압과 피크 값을 상호 비교하여 제출하여야 함.
- (2) 해석 프로그램의 신뢰도를 증명할 현장실험 데이터는 미기압과의 피크 값(최대값)이 허용기준치(터널출구 20m 위치에서 50Pa)보다 높게 나온 국내외 철도현장의 실험데이터들도 약 50% 포함되어야 함 (터널 출구면 부근에서의 시간에 대한 압력구배 비교로만은 신뢰도를 검증할 수 없다).
- (3) 터널 미기압과 환경영향평가 해석 보고서에는 터널 진입속도, 열차 전두부 제원, 열차 첫 번째 차량의 최대 투영단면적, 열차/터널의 유효단면적비, 터널 갭문형상 및 제원, 터널 연장, 콘크리트/발라스트 궤도형식, 터널내 시설물(사갱, 수직갱 댐퍼의 통풍 유효단면적, 기재갱 사양 등), 터널갭문 도면에서 환경영향평가위치 상세, 터널출구 외부주변 지형환경에 대한 상세(개활지 또는 V-컷 사면 기울기), 해석 시의 대기압 및 주변온도 값, 해석방법에 대한 설명, CFD 해석 시 사용한 경험

상수 값, 경험식을 사용할 경우에는 경험상수 값의 설명이 포함되어야 함.

- (4) 상기와 같이 검증된 해석프로그램만이 환경영향평가를 수행할 수 있도록 발주처에서는 터널설계 발주 시에 해석프로그램의 신뢰도 검증 보고서를 제출받아야 하며, 검증절차 자문위원회를 개최하여야 함. 터널 미기압과 환경영향평가가 완료되면 이에 대한 자문위원회도 개최하여야 함.

### 3. 국내외 설계정책 동향

가. 일본 신칸센의 최초 터널 미기압과 폭발을 발생 실태와의 비교

- 1964년, 최초로 운행 시작한 도카이도 신칸센은 발라스트 궤도 적용
- 1975년 3월, 산요 신칸센 오카야마-하카타 구간에 처음 콘크리트 슬라브 궤도 적용(유지보수를 간소화하기 위해 PC 슬라브 궤도 개발 적용함)
- 1975년 3월, 산요 신칸센의 개통을 위한 시운전시험에서 뜻하지 않게 터널 출구에서 폭발음(미기압과 소닉-붐) 발생됨.
- 일본 JR과 신칸센 건설국에서는 실태 해명을 위해 조사위원회를 구성하여 1976년도에 터널 미기압과 실태보고서 발간(새로운 환경문제 대두)
- 도카이도 신칸센과 터널 단면적(63.4m<sup>2</sup>)과 열차진입속도 200km/h는 같고 발라스트 궤도를 슬라브 궤도로만 변경하였는데 폭발음 발생됨.
- 터널 주변 민가에 폭발음과, 심한 경우는 주택의 유리창을 진동시켜서 파손시킴
  - ※ 참고문헌(일본 터널 미기압과 실태조사 보고서): 小沢 智, 森藤良夫, 前田達夫, 木下真夫: トンネル出口微気圧 波の実態, 鉄道技術研究報告, 1023(1976)

표 2.3.7 콘크리트궤도적용 터널의 폭발음 발생사례(1975년)와 비교로 분석/평가

구분	최고 운행속도	운행열차	터널 단면적	열차 단면적	터널 단면적에 대한 열차단면적 비율, B	미기압과 허용기준치를 초과하는 열차속도
산요 신칸센	200km/h (1975년)	0계, 100계 고속열차	63.4m <sup>2</sup>	12.6m <sup>2</sup>	0.199	210km/h (터널연장 4km 이하)
						200km/h (터널연장 4km~8km)
중앙선 단선터널	250km/h	EMU-250	40m <sup>2</sup>	11.48m <sup>2</sup>	0.287	200km/h보다 매우 낮은 속도
중앙선 복선터널	250km/h	EMU-250	66m <sup>2</sup>	11.48m <sup>2</sup>	0.174	215km/h보다 약간 높은 속도

※ 터널 미기압과 폭발음이 발생하는 열차진입속도는 터널연장에 따라 차이가 있음.

○ 검토결과

- 일본 신칸센의 최초 터널 미기압과 폭발을 발생 실태와의 비교에서 국내 250km/h급 신선의 단선터널들에 대해서는 미기압과가 매우 크게 발생될 것으로 판단됨. 특히 250km/h급 중앙선 도담-영천 철도 단선터널(40m<sup>2</sup>)은 일본의 신칸센 터널단면적 보다 2/3 수준으로 작고, 열차 운행속도도 50km/h가 더 높기 때문에 터널 미기압과 폭발음이 매우 크게 발생될 것으로 명확히 판단됨.

나. 상업운행으로 검증된 국외 설계사례와의 비교

표 2.3.8 상업운행으로 검증된 국외 설계사례에 의한 복선터널 사양 비교표

	운행속도	노선명	복선터널 단면적	미기압파 허용기준	미기압파 저감 후드
	260km/h	신칸센	63.4m <sup>2</sup> ~ 66m <sup>2</sup>	있음	적용
한국	250km/h	중앙선 등	66m <sup>2</sup>	없음	미적용

○ 검토결과

- EMU-250 차량의 투영단면적이 신칸센 차량 투영단면적보다 더 크게 제작되기 때문에 실제적으로 일본 신칸센과 비슷한 상황임. 따라서 연장 1km이상 터널에 대해서는 엄밀한 환경영향 평가를 통하여 미기압과 저감 후드를 적용하여야 함.

표 2.3.9 상업운행으로 검증된 국외사례에 의한 단선터널 사양 비교표

<최고속도 250km/h인 경우>

국가	운행속도	노선명	복선터널 단면적	미기압파 허용기준	미기압파 저감 후드
독일	250km/h	Karlsruhe-Basel 신선	62m <sup>2</sup>	있음	적용
한국	250km/h	중앙선 등	66m <sup>2</sup>	없음	미적용

<최고속도 200km/h인 경우>

국가	운행속도	노선명	복선터널 단면적	미기압파 허용기준	미기압파 저감 후드
중국	200km/h	수이유 고속철도	48.6m <sup>2</sup>	일본기준 적용	적용
한국	250km/h	중앙선 등	66m <sup>2</sup>	없음	미적용

○ 검토결과

- 국내 250km/h급과 200km/h급 신선의 단선터널들에 대해서는 미기압과가 매우 크게 발생될 것으로 판단됨. 특히 250km/h급 신규철도는 독일의 터널 표준단면적 보다 2/3 수준이기 때문에 터널 미기압과 폭발음이 매우 크게 발생될 것으로 예상됨.

표 2.3.10 폭발음 발생 동영상 터널에 의한 미기압과 영향 비교표

	진입속도	노선명	터널 단면적	터널명	터널길이	폭발음
	260km/h	도호쿠 신칸센	63.4m <sup>2</sup>	제 2 오오츠키	260m	크게 발생됨
일본	260km/h	도호쿠 신칸센	63.4m <sup>2</sup>	후쿠시마	11.7km	크게 발생됨
한국	250km/h	중앙선 등	66m <sup>2</sup>	전체 터널	전체연장	매우 크게 발생 확실

※ 일본 도호쿠 신칸센의 제2 오오츠키 터널과 후쿠시마 터널의 미기압과 폭발음 발생 동영상 파일은 별첨함.

○ 검토결과

- 일본 도호쿠 신칸센의 터널 미기압과의 폭발음 발생 동영상과 비교해 보았을 때, 국내 중앙선 등의 250km/h급 단선터널에서는 터널단면적과 열차진입속도 등의 설계사양이 심하게 충족하지 못하므로 미기압과 폭발음이 국제 기준치 이상으로 매우 크게 발생될 것으로 확실시 됨.

다. 대만 고속철도 사례

- 대만 고속철도는 최고 운행속도가 300km/h(설계속도 350km/h)이고, 터널 단면적은 90m<sup>2</sup> 이고, 시종점역 가까이나 300km/h 운행속도를 낼 수 없는 구간은 터널 단면적을 80m<sup>2</sup> 이하까지 축소하여 건설함.
- 대만 고속철도는 터널 내공단면적 90m<sup>2</sup>와 콘크리트 궤도 채택에 따른 영향으로 터널 미기압과가 발생함. 이에 대한 저감대책으로 3km 이상의 터널과 터널연장 3km 이하인 경우에도 터널갱구 주변에 민가가 있는 경우에는 미기압과 저감후드를 설치함. 터널후드는 터널 단면적의 1.5배로 설계하였으며, 길이는 최소 20m이상으로 함. 후드에는 각각 단면적 10m<sup>2</sup>이상의 통풍공(air shaft)을 2개씩 설치함(그림 2.3.8 참조).



그림 2.3.8 대만 고속철도 터널입구 후드(2006년)

라. 중국 신선 사례

(1) 중국 200km/h급 신선 사례

- 중국의 최고속도 200km/h의 일반철도 신선에 설치된 터널 미기압과 저감 후드는 일본 신칸센의 창문형 후드를 설치함.
- 후드가 설치된 사례로 송린바오(Songlinbao) 터널은 단선터널(48.6m<sup>2</sup>)이며, 콘크리트케도를 적용하였고, 터널 진입속도는 160km/h임.



그림 2.3.9 중국 일반철도 송린바오(Songlinbao) 터널개구의 미기압과 저감 후드

(2) 중국 300km/h급 신선 사례



그림 2.3.10 중국 양측 5개 창문형 후드(京滬高鐵西渚馬一號隧道)



그림 2.3.11 중국 상부 2개 창문형 후드



그림 2.3.12 중국 상부 4개 창문형 후드



그림 2.3.13 중국 단선병렬터널의 상부 통풍관형 후드

마. 독일 ICE 신선 사례

- 독일 고속철도의 Nuremberg-Ingolstadt 신선에서 2005년 12월에 ICE S, ICE 3 고속 열차로 열차속도 300km/h로 시험운행을 개시하자마자 연장 7.7km인 Euerwang 터널과 연장 7.26km인 Irlahüll 터널 갱구에서 심각한 미기압과 방사(sonic boom)문제가 발생함.

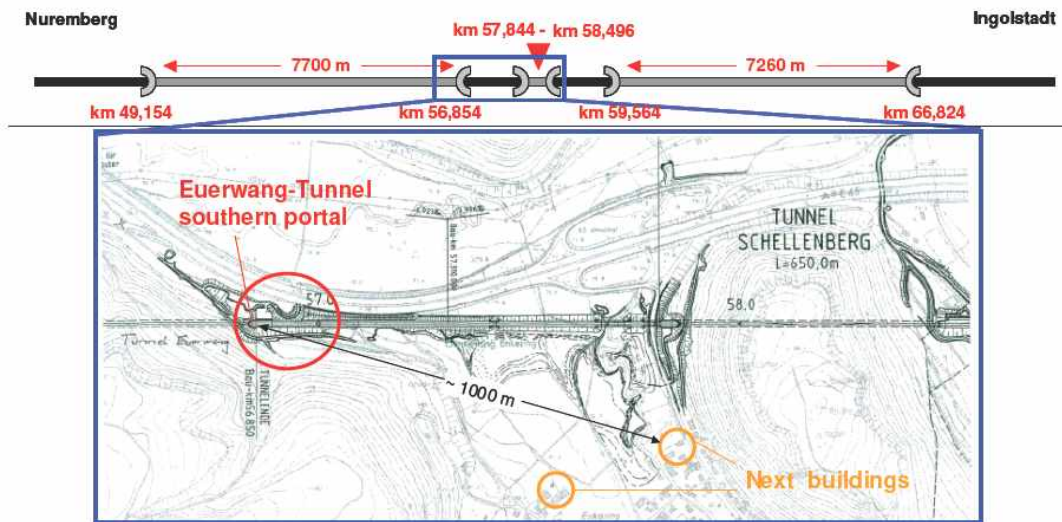


그림 2.3.14 독일 Euerwang 터널의 남쪽 민가지역

- 이러한 터널출구 미기압과 방사는 터널출구로부터 1km 떨어진 거리까지 영향을 끼쳐서 명확히 들리는 상황이었다. 이 터널들은 복선터널이고 터널단면적이 92m<sup>2</sup>임. 당초에 발라스트 궤도로 건설되도록 계획되어 있었으나 터널 굴착공사가 완공된 후에 콘크리트 궤도로 설계 변경되어 이러한 문제가 발생함.
- 문제가 되는 2개소의 터널 갱구로부터 가장 가까운 공공장소는 50m 거리에 있는 작은 도로이고, 민가는 1km 떨어진 위치에 있었다(그림 2.3.14 참조).
- 독일의 경우에 그동안 300km/h까지의 상업운행에서 발라스트 궤도를 적용한 터널(터널 단면적 92m<sup>2</sup>)에서는 터널출구 미기압과 방사의 환경소음이 문제 되지 않았다. 이는 발라스트 궤도를 사용하면 압력파의 압력기울기가 감소되어 터널출구에서 방사되는 미기압파가 약해지기 때문임. 그러나 콘크리트 궤도를 적용하면 반대로 압력파의 압력기울기가 더욱 증폭이 되어 미기압파가 크게 발생됨.
- 독일 Nuremberg-Ingolstadt 신선의 벨-마우스(45도 경사갱구) 터널 갱문은 미기압파를 어느 정도 감소시켜 주는데도 불구하고 미기압파 문제가 심각하게 발생함(그림 2.3.15 참조).



그림 2.3.15 독일 신선의 Euerwang 터널의 벨 마우스 갭문(남쪽 갭구)과 터널 갭구 부근의 A9 도로(갭문으로부터 50m 거리임)



그림 2.3.16 독일 ICE3 노선을 위한 슬롯형 “터널 미기압과 저감 후드 “ (독일 DLR)

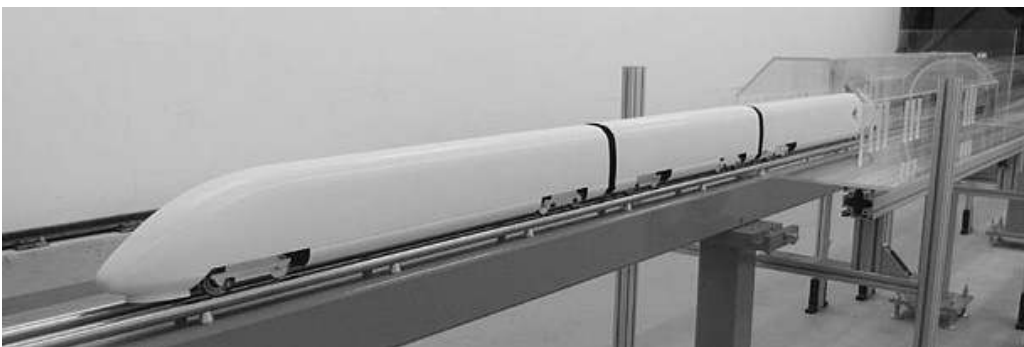


그림 2.3.17 독일 ICE3 노선을 위한 “터널 미기압과 저감 후드 “ 성능평가 열차 주행시험기(독일 DLR)

- 독일은 Nuremberg-Ingolstadt 신선에서 콘크리트 도상인 터널에서 미기압과 문제가 심각함을 인식하고, ICE 신선에 적용할 터널 미기압과 저감 후드를 선정하기 시작함.
- 그림 2.3.16과 그림 2.3.17은 독일 ICE 신선에 설치할 슬롯형 “터널 미기압과 저감 후

드”의 성능평가 열차주행시험을 보여주고 있음. 1/25 축척 시험장치이며, 후드모델은 2.67m(실척: 66.75m)이고 터널모델은 10m(실척: 250m) 길이임. 3량 1편성의 ICE3 열차모델의 최고속도는 360km/h임.

- 독일은 일본과 같은 창문형 후드를 사용함이고 볼 수 있음. 즉, 일본 신칸센 터널 미기압과 저감 후드를 약간 변형시킨 후드 디자인임. 창문의 위치를 상부 쪽으로 이동하여도 공기역학적 성능은 똑같이 발휘됨(그림 2.3.18 참조).

(1) 독일 Karlsruhe ~ Basel 신선(설계속도: 250km/h)의 사례



(a) 단선용 상부 슬롯형 후드



(b) 최종 시공된 후드 내부

그림 2.3.18 독일 Katzenberg Tunnel(연장 9.385 km)의 북쪽 갱구에 설치한 슬롯형 터널 미기압과 저감 후드

- 그림 2.3.18(a)는 독일 Katzenberg Tunnel(연장 9.385km, 터널내공단면적 62m<sup>2</sup>)의 북쪽 갱구에 설치된 슬롯형 터널 미기압과 저감 후드(후드길이 50m)의 초기 설계안임. Katzenberg Tunnel이 단선병렬터널이기 때문에 상부 천정 슬롯을 측벽으로 옮겨서 그림 2.3.18(b)와 같이 단선병렬터널에서 2개의 터널이 같이 사용하도록 함.

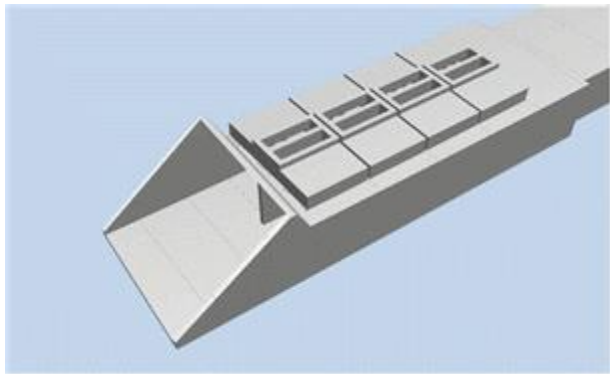


그림 2.3.19 독일 Katzenberg Tunnel(연장 9.385 km)의 북쪽 갱구에 설치된 슬롯형 터널 미기압과 저감 후드(후드길이 50m)

- 독일 Katzenberg Tunnel(연장 9.385km)은 단선병렬터널이며, Karlsruhe와 Basel 사이

의 신선에 위치한 터널임. 이 터널 북쪽 갱구에는 그림 2.3.19와 같이 슬롯형 미기압과 저감 후드가 설치됨. Karlsruhe ~ Basel 신선은 운행속도 250km/h이고 2012년 12월에 개통함. 도담-영천 신선과 같은 설계사양임.

- 그림 2.3.20는 독일 ICE 신선 Katzenberg Tunnel(연장 9.385 km)의 남쪽 갱구에 적용된 상부 슬롯형 후드임. 그림 2.3.20 (a)는 상부 슬롯형 후드(남쪽 갱구)의 전체모습이고, 그림 2.3.20 (b)는 상부 슬롯형 후드를 현장에 시공한 사진임.

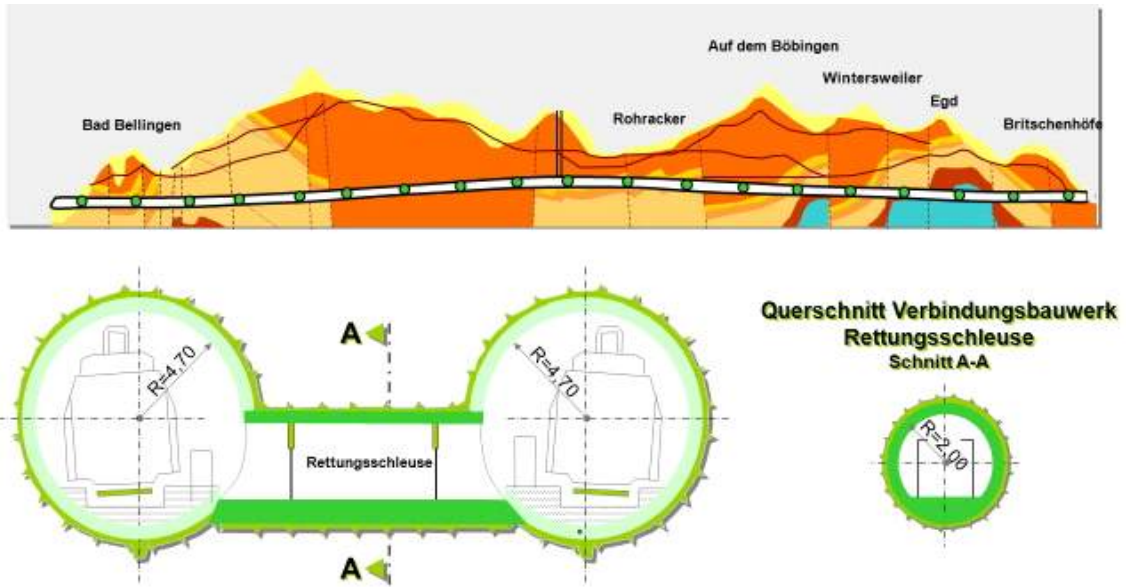


(a) 상부 슬롯형 후드(남쪽 갱구)

(b) 상부 슬롯형 후드의 시공모습

그림 2.3.20 독일 Katzenberg Tunnel(연장 9.385 km)의 남쪽 갱구에 설치된 슬롯형 터널 미기압과 저감 후드

- 독일 Katzenberg Tunnel(연장 9.385 km)은 그림 2.3.21 (a)에서와 같이 터널 종방향으로 500m마다 승객탈출용 횡갱(cross passage)이 19개소 설치되어 있는데, 이 횡갱의 방화문은 횡갱 안쪽으로 설치하여 500m마다 터널단면적 변화가 되도록하여 압력파가 어느 정도 소산되도록 설계함. 즉 터널 단면적이 500m마다 확폭이 됨. 즉 터널 내공단면적이 커지는 효과를 적용하였으며, 횡갱의 방화문 위쪽에 댐퍼를 설치할 경우에는 터널내의 압력변동량과 터널 출구의 미기압과의 감쇄효과가 매우 커진다.

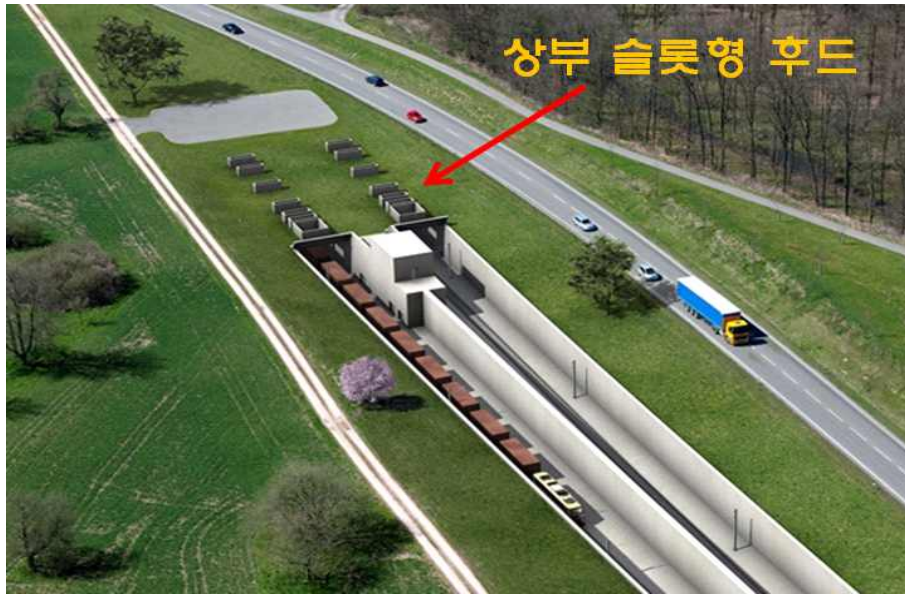


(a) 독일 Katzenberg Tunnel 종단면도: 500m마다 횡갱을 19개 설치



(b) 시운전 시험 및 터널 방재훈련((2012년12월9일 개통)

그림 2.3.21 독일 Katzenberg Tunnel(연장 9.385 km)의 전체 개요도

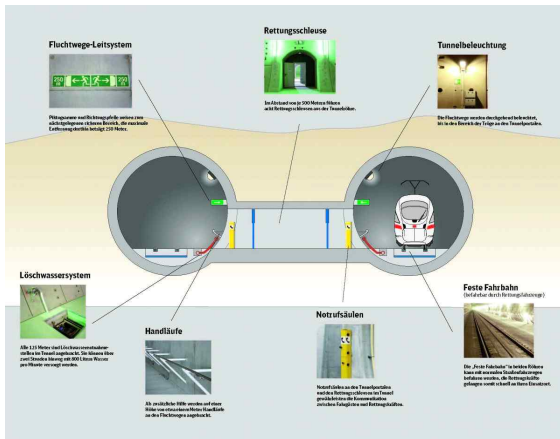


(a) 상부 슬롯형 후드(북쪽 갱구)

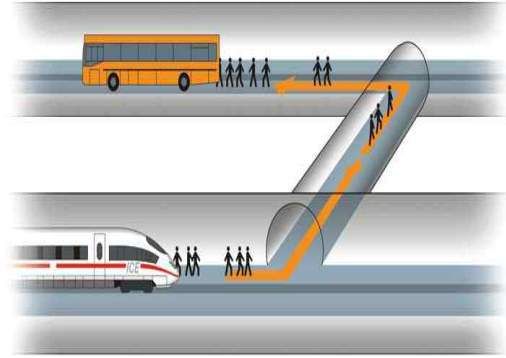


(b) 상부 슬롯형 후드(남쪽 갱구)

그림 2.3.22 설계속도 250km/h의 독일 Rastatt Tunnel(연장 4.270 km)의 갱구에 설치되는 슬롯형 터널 미기압과 저감 후드(단선병렬터널 내부 500m마다 횡갱 7개 설치, 2013년 착공함)



(a) 터널 방재대책



(b) 터널 내 사고시 승객 피난탈출 동선

그림 2.3.23 독일 Rastatt Tunnel(연장 4.270 km)의 승객 탈출용 횡갱과 방재대책(터널내 부 500m마다 횡갱 7개 설치, 2013년 착공함)

○ 설계속도 250km/h인 독일 Rastatt Tunnel(연장 4.270 km)은 그림 2.3.22과 같이 터널 입구와 출구에 각각 상부 슬롯형 후드가 설치되고, 단선병렬터널 내부 500m마다 승객 탈출용 횡갱이 7개 설치되도록 설계함(그림 2.3.23 참조요망). Katzenberg Tunnel과 마찬가지로 횡갱 7개소에서 터널의 확폭효과를 주었다.

(2) 독일 Erfurt ~ Leipzig/Halle 신선(설계속도: 300km/h)의 사례



(a) 슬롯형 후드(동쪽 갱구)



(b) 슬롯형 후드(서쪽 갱구)

그림 2.3.24 독일 Osterberg Tunnel(연장 2.082 km)의 갱구에 설치된 슬롯형 터널 미기압 파 저감 후드(터널내부 400m마다 횡갱 4개 설치됨, 2015년 개통예정)



(a) 슬롯형 후드(동쪽 갱구)



(b) 슬롯형 후드(서쪽 갱구)

그림 2.3.25 독일 Bibra Tunnel(연장 6.466 km)의 갱구에 설치된 슬롯형 터널 미기압과 저감 후드(터널내부 500m마다 횡갱 13개 설치됨, 2015년 개통예정)



(a) 슬롯형 후드(서쪽 갱구)



(b) 슬롯형 후드(동쪽 갱구)

그림 2.3.26 독일 Fine Tunnel(연장 6.970 km)의 갱구에 설치된 슬롯형 터널 미기압과 저감 후드(터널내부 500m마다 횡갱 13개 설치됨, 2015년 개통예정)

(3) 독일 Ebensfeld - Erfurt 신선(설계속도: 300km/h)의 사례

○ 독일 Ebensfeld - Erfurt 신선은 설계속도 300km/h, 터널 내공단면적 92m<sup>2</sup>, 콘크리트 궤도를 적용하였으면 2017년 완공예정임.



그림 2.3.27 독일 Bleßberg Tunnel(연장 8.314 km, 외부연결 사갱 8개소)에 설치된 슬롯형 터널 미기압과 저감 후드(터널 내공단면적 92m<sup>2</sup>, 2017년 개통예정)



(a) 슬롯형 후드(남쪽 갱구)

(b) 슬롯형 후드(북쪽 갱구)

그림 2.3.28 독일 Silberberg Tunnel (연장 7.391 km, 외부연결 사갱 8개소)의 갱구에 설치된 슬롯형 터널 미기압과 저감 후드(터널 내공적 92m<sup>2</sup>, 2017년 개통예정)

#### 바. 프랑스 신선 사례

- LGV Perpignan-Figueres line에서 프랑스와 스페인 국경에 위치한 Perthus 터널은 연장이 8.3km이고 2010년 12월에 상업운행을 시작함. Perthus 터널은 콘크리트 궤도를 적용하였고, 여객열차와 화물열차 혼용 노선임.
- 단선병렬터널로서 200m마다 횡갱(cross passage)을 설치하여 전체 41개소의 승객 탈출용 횡갱이 설치되어 있고, 4개소의 기재갱을 설치함.
- Perthus 터널의 양쪽 갱구에는 “창문형의 미기압과 저감 후드”가 각각 2개소씩 설치되어 있음.(그림 2.3.29 참조) 일본 신칸센 터널 미기압과 저감 후드를 약간 변형시킨 후드 디자인임. 창문의 위치를 상부쪽으로 이동하여도 공기역학적 성능은 똑같이 발휘됨.



그림 2.3.29 Perthus 터널 갱구의 창문형 미기압과 저감 후드 상세모습



그림 2.3.30 프랑스 미기압과 저감후드: 시계 방향으로 후드전면 경사각 모습, 후드 내부에서의 창문 모습, 후드 시공모습

● Tartaignille Tunnel(TGV) ● Roque-Rousse Tunnel(TGV)



그림 2.3.31 프랑스 Tartaignille 터널, Roque-Rousse 터널 등의 터널입구 후드

사. 최근 일본 신칸센의 설계사례



(a) 강제구조 터널갱구 후드      (b) 반대편 터널갱구(미기압과 발생지역)

그림 2.3.32 일본 산양 신칸센의 강제구조(데크 플레이트)의 터널입구 후드



그림 2.3.33 일본 큐슈 신칸센 터널입구 후드(2011년): 콘크리트로 시공한 후드

- 일본 큐슈 지역에 신칸센 운영을 위하여 발생하는 터널 출구의 미기압과에 따른 환경소음을 감소하기 위하여 설치된 미기압과 저감용 터널 후드를 견학하여 전문가로부터 관련 기술을 수집할 수 있었다(2012년 3월). 터널후드는 공장에서 형태에 따라 형상을 제







그림 2.3.37 일본 동북 신칸센의 미기압과 저감용 터널입구 “창문형 후드”의 상세사진(1998년형으로 추정됨)



(a) 후드 상부의 압력경감 통풍구



(b) 후드 측벽의 압력경감 창문의 상세

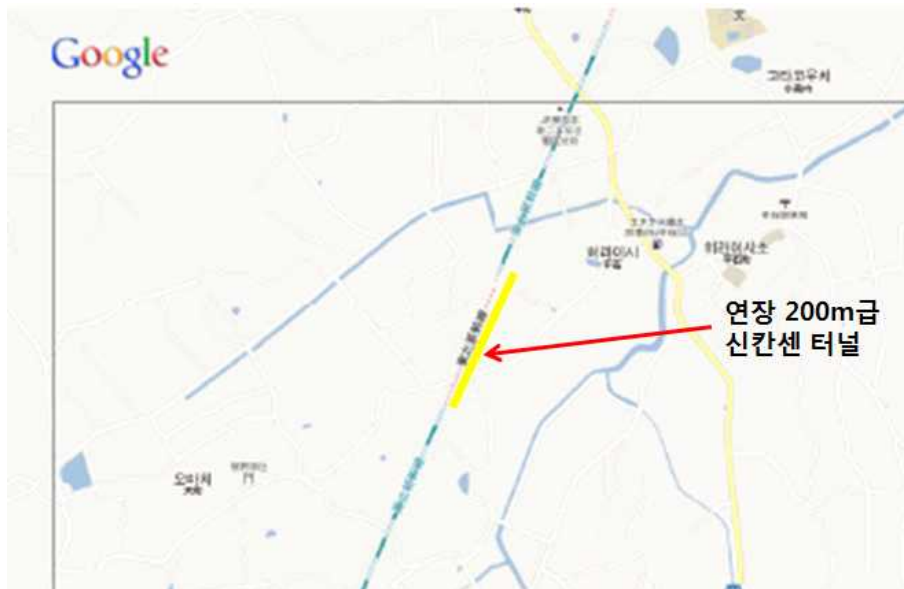
그림 2.3.38 일본 동북 신칸센의 제형 터널입구 후드의 상세(2009년형)

- 운행속도 200km/h 이상의 고속철도에서 터널 미기압과 저감 후드 대책은 시공비가 저렴하며, 궁극적으로 최적설계의 터널 단면적에서 적용되기 때문에 최선의 터널 건설비

절감 방법임.

아. 일본 신칸센의 터널연장에 대한 후드 설치사례

○ 일본 신칸센은 다음의 위성사진과 같이 터널연장 200m급 터널에도 미기압과 저감후드를 설치하고 있음.(일본 도후쿠 신칸센, 터널내공단면적  $63.4\text{m}^2$ ).



(a) 히라이시의 신칸센 터널



(b) 나카시마의 신칸센 터널

그림 2.3.39 일본 도후쿠 신칸센의 200m급 터널의 미기압과 저감대책 사례(후쿠오카현)



그림 2.3.40 일본 후쿠오카현 니혼마쓰 히라이시 부근 신칸센 터널(위성사진)



그림 2.3.41 일본 후쿠오카현 나카마시 부근의 신칸센 터널(위성사진)

○ 구글(Google) 위성지도에서 최대 해상도로 확대하면 보면, 적용된 후드의 기본사양은 확인할 수 있음.

자. 궤도구조 방식과 터널 연장에 따른 터널 미기압파의 크기



그림 2.3.42 일본 산양 신칸센 오히라야마 터널(연장 6.64 km, 콘크리트 궤도)에 설치된 장대터널용 터널입구 후드(후드길이 49m)

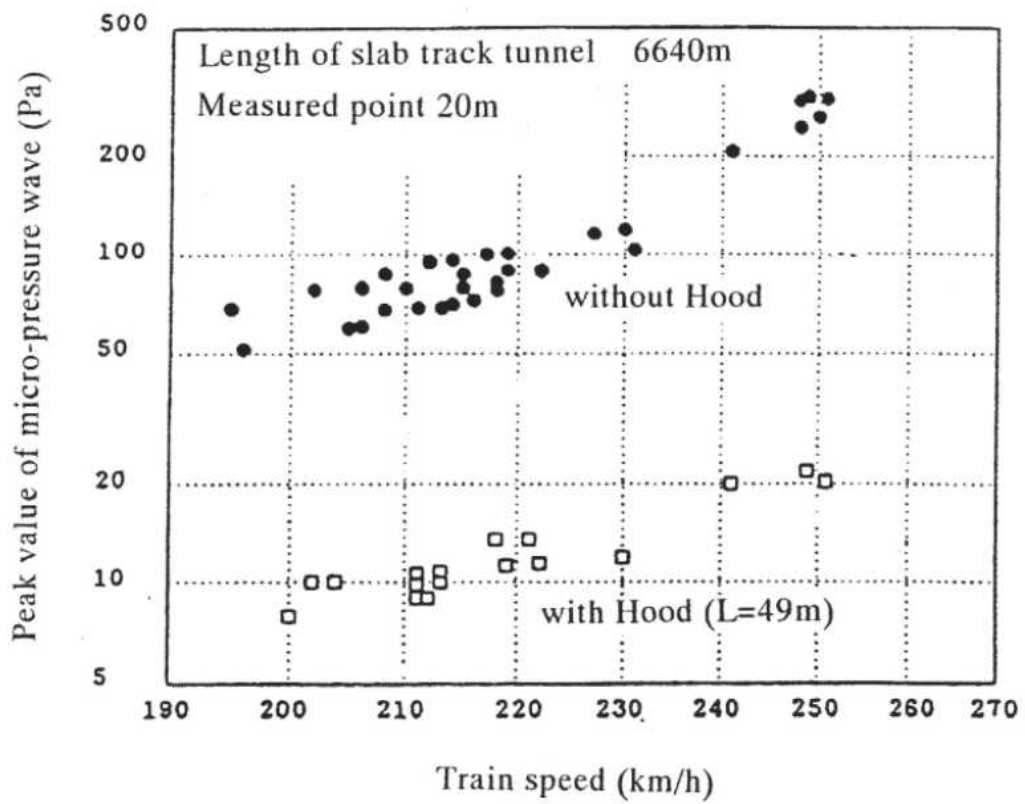


그림 2.3.43 터널입구 후드의 효과 (후드길이 49m)

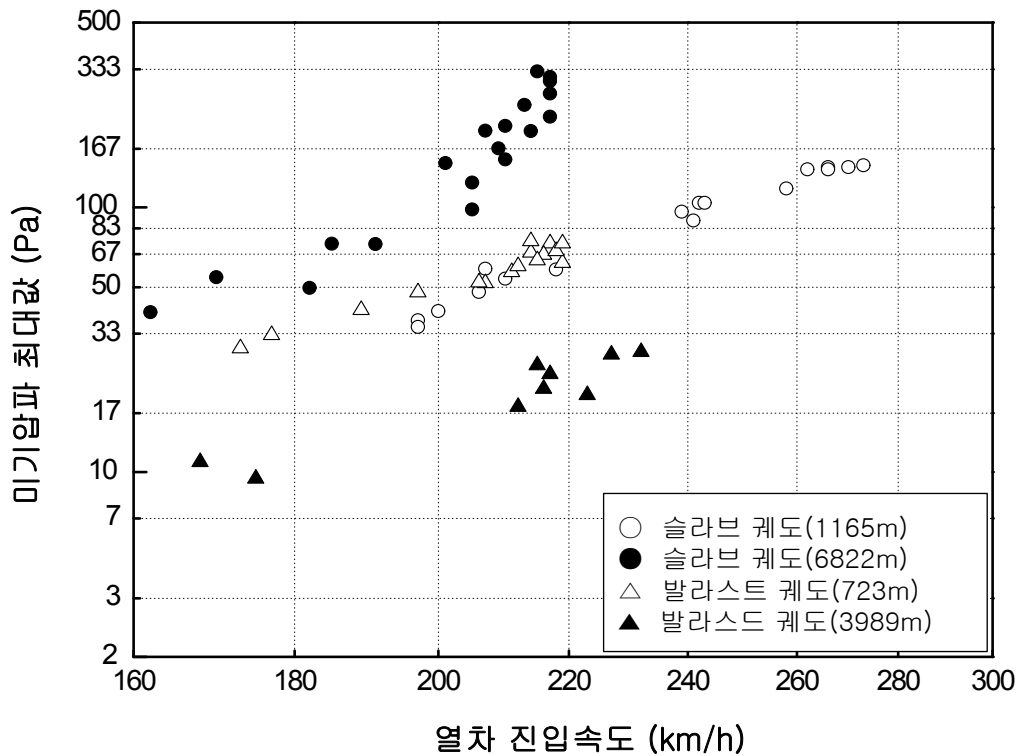


그림 2.3.44 일본 신칸센 터널에서 열차진입 속도에 따른 미기압과 최대값(현장 시험 데이터, 터널출구중심으로부터 20 m 지점)

- 그림 2.3.42과 그림 2.3.43의 일본 산양 신칸센 오히라야마 터널(복선터널, 터널 내공단면적 약 63.5m<sup>2</sup>) 사례에서 알 수 있듯이, 장대터널에서는 미기압과 저감 후드(완충공)의 연장이 길어지게 됨. 이유는 그림 2.3.44의 일본 신칸센 현장시험 데이터의 그래프에서 볼 수 있듯이, 발라스트 궤도인 경우는 터널 연장이 길어지면 터널 출구에서 방사되는 미기압파가 감쇄 되지만, 콘크리트 궤도(슬라브 궤도)인 경우는 터널이 길어질수록 압력과 기울기가 가파르게 증폭이 되어 터널 출구에서의 미기압파가 매우 크게 발생됨.
- 장대터널의 경우에, 발라스트(자갈) 궤도보다 콘크리트 궤도에서 터널 출구 미기압파가 20배 정도 크게 발생됨(그림 2.3.44 참조요망).
- 같은 콘크리트 궤도 터널의 경우에 1km급 터널보다 7km급 터널에서 터널 출구 미기압파가 5배 정도 크게 발생됨(그림 2.3.44 참조요망).

차. 한국 호남고속철도 증속구간 후드설치 사례

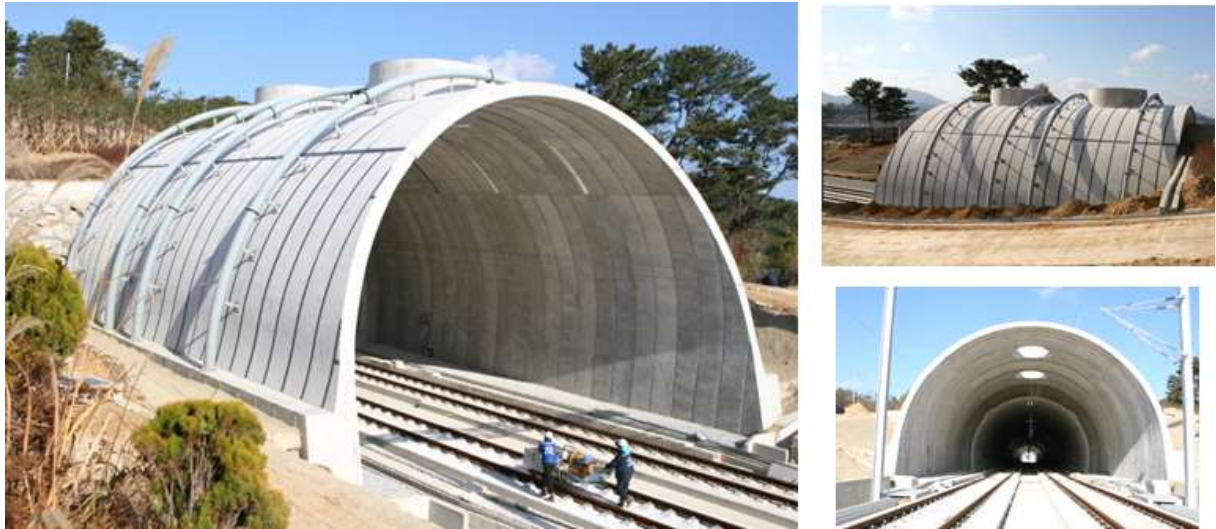


그림 2.3.45 호남고속철도 우산터널의 통풍관형 후드

○ 호남고속철도 400km/h급 증속구간인 우산터널 시점에 “한국형 터널 미기압과 저감 후드” 를 한국철도기술연구원에서 개발하여 설치 완료됨(2013년 8월30일 완공함).

하. 호남고속철도 증속구간의 터널 미기압과 현장시험 결과 검토

(1) 터널 미기압과 현장시험 개요



그림 2.3.46 터널 미기압과 측정 전경(회룡터널 출구 20m에서의 미기압과 측정)

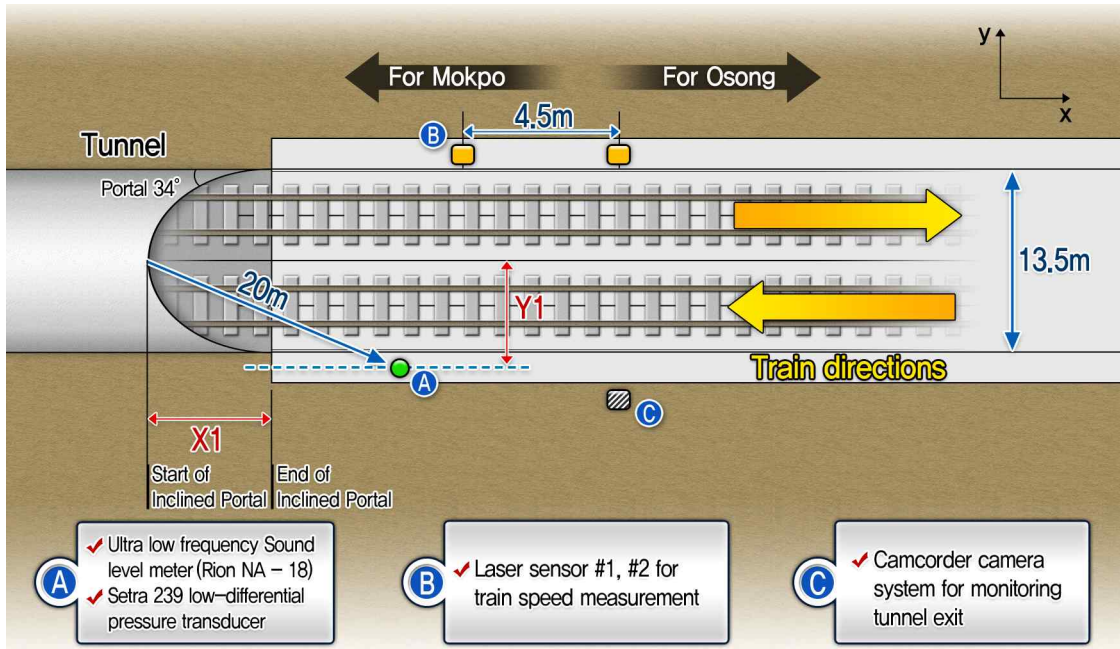


그림 2.3.46 호남고속철도 회룡터널 시점의 계측시스템 배치도

(2) 터널 미기압과 현장시험 결과

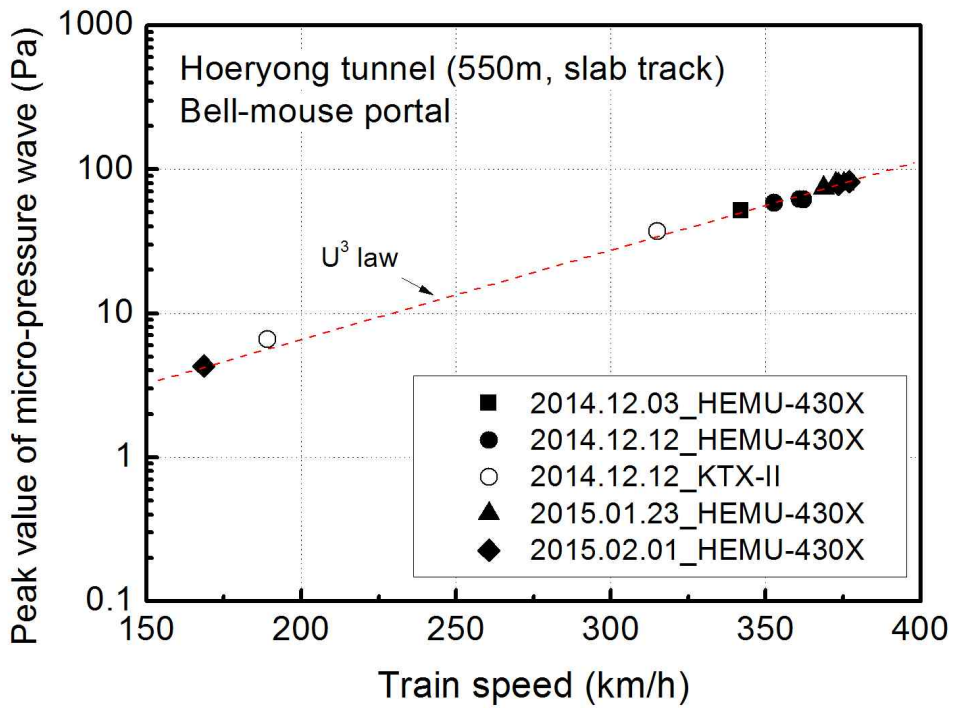


그림 2.3.47 열차진입속도에 따른 터널 출구에서의 미기압과 피크값 (HEMU-430X, KTX-호남]

- 호남고속철도 증속구간에서 HEMU-430X 고속열차로 비교적 짧은 터널인 회룡터널 (550m) 출구 외부 20m지점에서 터널 미기압파를 측정
- 터널진입속도 342km/h에서 51Pa의 터널 미기압파가 방사되었음.
- 국제기준으로 참고하고 있는 일본기준이 터널 출구 20m지점에서 50Pa 이하로 권고하고 있는데 열차진입속도 342km/h에서 이 수치를 넘고 있음.
- 고속철도에서 콘크리트 궤도를 적용한 터널은 터널연장이 길어질수록 미기압파는 열차 진입속도의 3승 이상으로 비례하여 크게 증가함.

#### 4. 분석결과에 따른 시사점

- 경부/호남 고속철도는 터널 진입속도 대비 터널 내공단면적이 매우 크기 때문에 “터널 미기압파” 라는 폭발음 발생문제가 없음.
- 한국, 유럽, 중국, 일본 등에서는 앞으로 신규철도 건설에서 유지보수와 하중문제로 콘크리트 궤도를 적용하고 있는데, 콘크리트 궤도에서는 터널 출구 폭발음이 더 크게 증폭이 됨.
- 고속철도 보유국들은 터널건설비와 유지보수비용을 저감시키고자 터널 내공단면적을 슬림화하고 콘크리트 궤도를 적용하고 있는데, 이 때 나타나는 문제점인 터널 출구 폭발음을 터널갱구에 설치하는 “미기압파 저감 후드” 로 해결하고 있음.  
 ※ 일본 뿐 아니라 2008년 이후로 독일, 프랑스, 중국 등은 철도터널 건설비를 최소화 하고자 “미기압파 저감 후드” 를 터널설계에 반영하였음.

구분	최고 운행속도	운행열차	터널 단면적	열차 단면적	터널 단면적에 대한 열차단면적 비율, B	미기압파 허용기준치를 초과하는 열차속도
산요 신칸센	200km/h (1975년)	0계, 100계 고속열차	63.4m <sup>2</sup>	12.6m <sup>2</sup>	0.199	210km/h (터널연장 4km 이하)
						200km/h (터널연장 4km~8km)
중앙선 단선터널	250km/h	EMU-250	40m <sup>2</sup>	11.48m <sup>2</sup>	0.287	200km/h보다 매우 낮은 속도
중앙선 복선터널	250km/h	EMU-250	66m <sup>2</sup>	11.48m <sup>2</sup>	0.174	215km/h보다 약간 높은 속도

※ 터널 미기압파 폭발음이 발생하는 열차진입속도는 터널연장에 따라 차이가 있음.

- 국외 미기압파 폭발음 발생 사례와의 비교

- 일본 신칸센의 최초 터널 미기압과 폭발을 발생 실태와의 비교에서 국내 250km/h급 신선의 단선터널들에 대해서는 미기압과가 매우 크게 발생될 것으로 판단됨. 특히 250km/h급 중앙선 도담-영천 철도 단선터널(40m<sup>2</sup>)은 일본의 신칸센 터널단면적 보다 2/3 수준으로 작고, 열차 운행속도도 50km/h가 더 높기 때문에 터널 미기압과 폭발음이 매우 크게 발생될 것으로 판단됨.

○ 국내에 터널출구 미기압과 허용기준 필요

- 산악이 많은 국내의 지형환경에서, 철도터널 건설비/운영비를 최적화하기 위하여 콘크리트케도 적용과 터널내공단면적을 최소화하는 과정에서 환경적인 측면으로 나타나는 터널출구 폭발음의 소음·진동 문제에 대한 터널 미기압과 허용기준 필요.
- 특히, 중앙선 도담-영천 단선터널은 터널단면적이 40m<sup>2</sup>로 세계 최소단면적에서 250km/h의 운행속도로 설계되어 미기압과 허용기준이 시급히 필요함.
- 국내 고속철도의 해외수출을 고려하여, 국제기준에 부합하는 미기압과 허용기준(규제치) 정립이 시급히 필요함.

## 4절 연구개발 인프라 분석

### 1. 터널 미기압과 관련 연구기관 현황

표 2.4.1 철도터널 미기압과 평가 및 저감 대책 관련 연구기관

연구기관	연구기관 기술 수준
한국철도기술 연구원	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 고속열차 및 철도터널 공기역학 기술개발</li> <li>• 터널 미기압과 환경영향평가 해석 및 시험 기술개발</li> <li>• 터널 미기압과 저감 대책 기술개발</li> <li>• 터널 미기압과 저항형 전두부 기술개발</li> <li>• 터널 주행시 승객 이명감 저감대책 기술개발</li> <li>• 400km/h급 고속열차 및 인프라 기술개발</li> <li>• 500km/h급 고속철도 기술개발</li> <li>• 철도터널 환기 및 방재 기술개발</li> <li>• 첨단 신소재 적용기술 개발</li> <li>• 미래수송시스템 차량 및 인프라 기술개발</li> <li>• 초고속 튜브열차 개발</li> <li>• 초고속 튜브열차 시스템엔지니어링 및 시험평가 기술개발</li> </ul>
한국건설기술 연구원	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SMART 터널 Observation Expert System 개발</li> <li>• 지하공간 환경개선 및 방재기술 연구사업(지하구조물 재해손상 대응 기술)</li> </ul>
한국항공기술 연구원	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 고속열차 전두부 저저항 설계 풍동시험 기술</li> </ul>

표 2.4.2 터널 미기압과 관련 해외기관 현황

연구기관	연구기관 기술 현황
일본 RTRI (Railway Technical Research Institute)	<ul style="list-style-type: none"> <li>고속열차 및 철도터널 공기역학 기술개발</li> <li>터널 미기압파 환경영향평가 해석 및 시험 기술개발</li> <li>터널 미기압파 저감 대책 기술개발</li> <li>터널 미기압파 저감형 전두부 기술개발</li> <li>터널 주행시 승객 이명감 저감대책 기술개발</li> <li>500km/h급 고속철도 기술개발</li> </ul>
독일 DBR (Deutsche Bahn Research) 독일 DLR (German Aerospace Center)	<ul style="list-style-type: none"> <li>고속열차 및 철도터널 공기역학 기술개발</li> <li>터널 미기압파 환경영향평가 해석 및 시험 기술개발</li> <li>터널 미기압파 저감 대책 기술개발</li> <li>터널 미기압파 저감형 전두부 기술개발</li> <li>터널 주행시 승객 이명감 저감대책 기술개발</li> <li>500km/h급 고속철도 기술개발</li> </ul>
프랑스 SNCF	<ul style="list-style-type: none"> <li>고속열차 및 철도터널 공기역학 기술개발</li> <li>터널 미기압파 환경영향평가 해석 및 시험 기술개발</li> <li>터널 주행시 승객 이명감 저감대책 기술개발</li> <li>400km/h급 고속철도 기술개발</li> </ul>
중국 Central South University (Key lab. for track traffic safety of Ministry of education )	<ul style="list-style-type: none"> <li>고속열차 및 철도터널 공기역학 기술개발</li> <li>터널 미기압파 환경영향평가 해석 및 시험 기술개발</li> <li>터널 주행시 승객 이명감 저감대책 기술개발</li> <li>400km/h급 고속철도 기술개발</li> </ul>
영국 Dundee Research 영국 University of Manchester	<ul style="list-style-type: none"> <li>고속열차 및 철도터널 공기역학 기술개발</li> <li>터널 미기압파 환경영향평가 해석 및 시험 기술개발</li> <li>터널 주행시 승객 이명감 저감대책 기술개발</li> </ul>
네덜란드 NLR (National Aerospace Laboratory)	<ul style="list-style-type: none"> <li>고속열차 및 철도터널 공기역학 시험평가 기술개발</li> <li>터널 미기압파 환경영향평가 시험 기술개발</li> </ul>

## 2. 터널 미기압과 관련 R&D 인프라 현황

○ 고속철도 보유국에서는 터널 미기압파(폭발음)를 저감시키기 위하여 터널갱구에 “미기압파 저감 후드”를 적용하는데, 이 후드를 개발하고 성능 검증하기 위하여 열차모델을 실제속도로 주행시켜서 터널출구에서의 미기압파 저감 성능을 파악하는 터널주행 열차모델 주행시험기(Moving Model Test Rig)를 보유하고 있음. 다음은 철도선진국에서 보유하고 있는 주행시험기임.

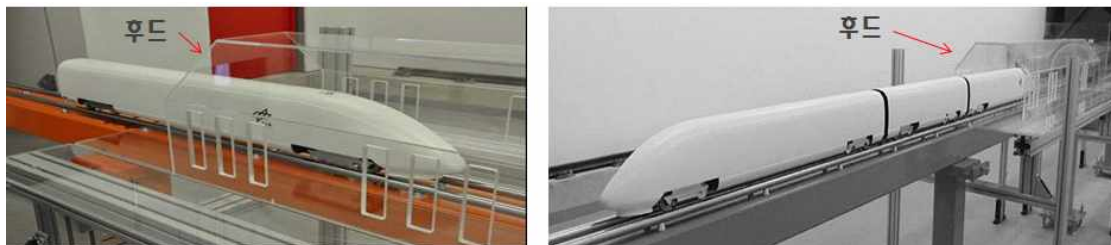


그림 2.4.1 독일 DLR의 열차모델 주행시험기(최고속도 360km/h, 1:25 축척 시험기)



그림 2.4.2 영국 MU의 열차모델 주행시험기(최고속도 270km/h, 1:25 축척 시험기) : 프랑스 SNCF와 공동사용 시험설비

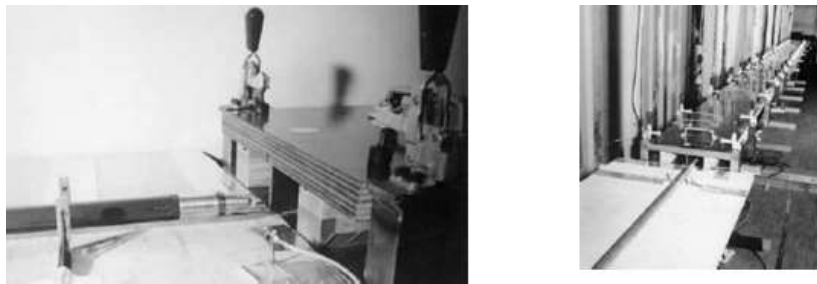


그림 2.4.3 네덜란드 NLR의 열차모델 주행시험기(최고속도 300km/h, 1:170 축척 시험기)

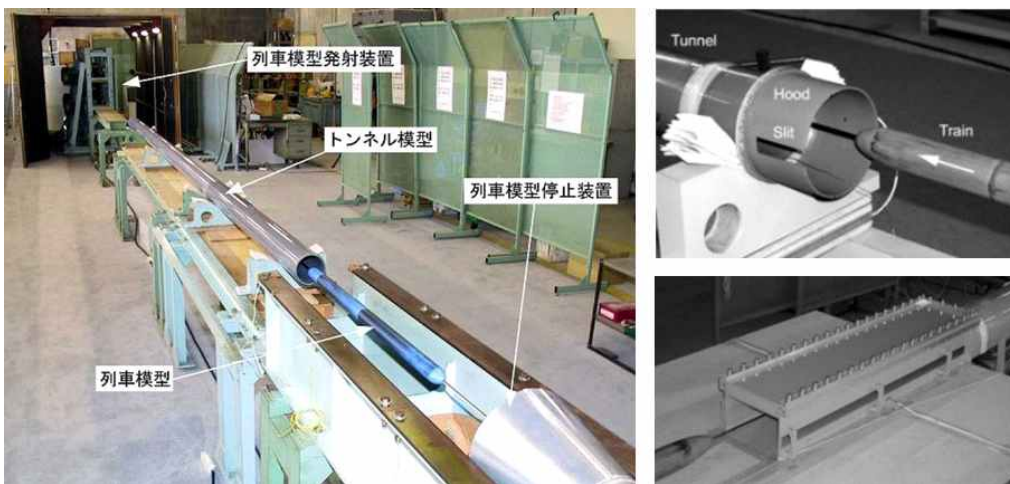


그림 2.4.4 일본 철도종합연구소의 열차모델 주행시험기(최고속도420km/h, 1:60축척 시험기)

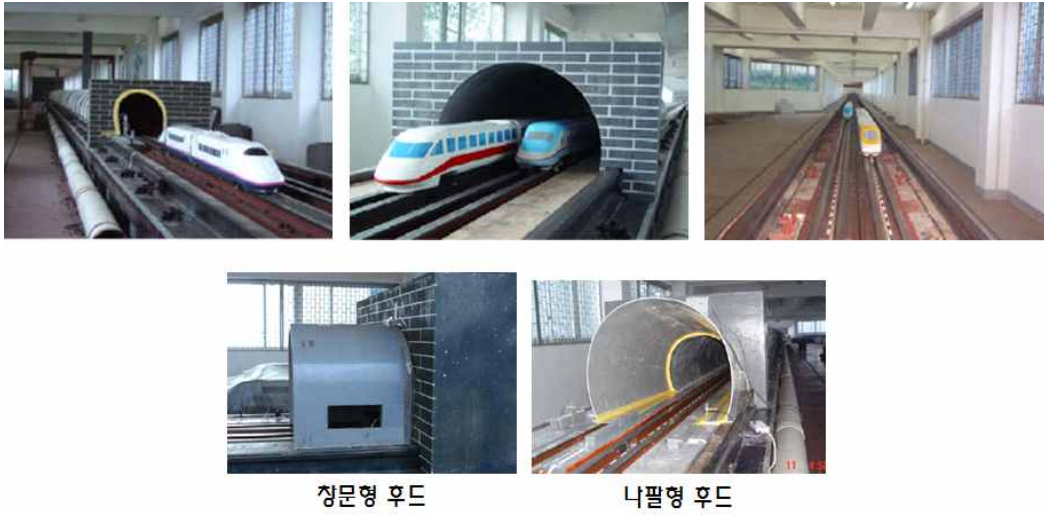


그림 2.4.5 중국 CSU의 열차모델 주행시험기(최고속도 400km/h, 1:18 축척 시험기)



그림 2.4.6 한국철도기술연구원의 열차모델 주행시험기(최고속도 1,060km/h, 1:61 축척 시험기)

- 터널 미기압파(폭발음)를 저감시키기 위하여 터널입구에 “미기압파 저감 후드” 를 설치하는데, 이 후드를 개발하고 성능검증하기 위하여 열차모델을 실제속도로 주행시켜서 터널출구에서의 미기압파 저감 성능을 파악하는 터널주행 열차모델 주행시험기(Moving Model Test Rig)의 보유가 필수적임.
- 한국철도기술연구원의 초고속 열차모델 주행시험기(1:60축척 주행시험장치)는 자체 독자모델로 설계 및 제작한 주행시험장치(특허등록번호: 10-0367627, 10-0389164, 특허출원번호:10-2014-0163549)이며, 2014년에 주행장치의 초고속 피스톤밸브 적용으로 최고속도 470km/h에서 최고속도 1,060km/h로 성능 업그레이드를 달성하였음(3량1편성기준).

### 3. 터널 미기압과 관련 전문가 현황

표 2.4.3 터널 미기압과 관련 전문가 현황 및 활용 분야

성명	소속	기술 현황	관련 세부과제	참여방안
김희동	안동대학교	터널 미기압파 이론 및 수치해석, 충격파 압축성 유체역학	국내 고속열차 차량 특성과 철도터널 주변 환경에 대한 미기압파 민감도 연구	전문가 자문
김찬중	서울대학교	터널 공기역학 CFD 해석	준고속철도용 터널 미기압파 저감 대책 실용화 기술 개발	전문가 자문
권혁빈	한국교통대학교	터널 공기역학 CFD 해석	준고속철도용 터널 미기압파 저감 대책 실용화 기술 개발	전문가 자문
유지오	신흥대학	터널 공기역학 CFD 해석	250km/h급 고효율 후드의 실용화 구조안정성 및 공용중 시공성 향상 기술개발	전문가 자문
조형제	(주)범창종합기술	터널 공기역학 설계 및 해석	준고속철도용 터널 미기압파 저감 대책 실용화 기술 개발	전문가 자문
이호석	(주)비엔텍아이엔씨	터널 공기역학 설계 및 해석	250km/h급 고효율 후드의 공기역학적 성능평가 및 모니터링 기술개발	위탁기관 책임자
강현욱	(주)비엔텍아이엔씨	터널 공기역학 설계 및 해석	250km/h급 고효율 후드의 공기역학적 성능평가 및 모니터링 기술개발	위탁기관 참여
김동현	한국철도기술연구원	터널 미기압파 이론 및 실험	준고속철도용 터널 미기압파 저감 대책 실용화 기술 개발	주관기관 책임자
곽민호	한국철도기술연구원	터널 미기압파 실험	준고속철도용 터널 미기압파 저감 대책 실용화 기술 개발	위탁과제 참여
황선근	한국철도기술연구원	저주파 소음/진동 공학	250km/h급 고효율 후드의 실용화 구조안정성 및 공용중 시공성 향상 기술개발	전문가 자문

표 2.4.4 터널 미기압과 관련 해외전문가 현황

성명	소속	기술 현황
M. Iida	Railway Technical Research Institute, Japan	터널 미기압파 이론 및 실험
T. Fukuda	Railway Technical Research Institute, Japan	터널 미기압파 이론 및 실험
M.S. Howe	Boston University	터널 미기압파 이론
T. Aoki	Kyushu university	터널 미기압파 이론 및 실험
A. Vardy	Dundee University, UK	철도터널 공기역학
Th. Tielkes	Deutsche Bahn AG	터널 미기압파 이론 및 실험

K.G. Degen	Deutsche Bahn AG	터널 미기압파 이론 및 실험
M. Hieke	Deutsche Bahn AG	터널 미기압파 이론 및 실험
Prof. Baker	University of Manchester, UK	철도터널 공기역학
Xin-tao Xiang	Shanghai Jiao Tong University, China	3차원 수치해석 기술
Tang-hong Liu	Central South University, China	터널 미기압파 이론 및 실험
Hong-qi Tian	Central South University, China	터널 미기압파 이론 및 실험
Xi-feng Liang	Central South University, China	터널 미기압파 이론 및 실험

\* 은퇴자는 제외함

## 5절 국내외 기술수준 분석

### 1. 터널 미기압과 환경소음/진동 문제의 관심

- 미기압과 문제는 2004년도까지 주로 일본에서만 크게 관심을 가져왔고, 다음과 같은 이유로 일본 철도에서만 문제가 되어 왔음.
  - 터널 건설의 적용형태: 콘크리트궤도, 더 작은 터널 내공단면적 적용.
  - 유럽보다 더 빠른 신칸센 열차.
  - 유럽보다는 고속철도 부근에 더 밀집한 거주지.
- 2006년, 독일에 신선이 Nuremberg-Ingolstadt 사이에 건설되고, 첫 번째 시운전시험(300km/h) 동안에 2개소의 장대터널 갱구에서 매우 큰 폭발음이 발생됨(Euerwang 터널과 Irlahull 터널: 내공단면적 92m<sup>2</sup>).
  - 발라스트궤도에서 콘크리트궤도로의 설계변경이 이러한 미기압과 폭발음을 야기 하였음.
  - 유럽에서는 앞으로 신선 건설에서 유지보수와 하중문제로 콘크리트궤도가 적용될 것임.
  - 유럽에서는 안전상의 이유와 터널 내공단면적이 더 작은 단선병렬터널로 건설될 것임.
- 한국과 유럽에서는 앞으로 이러한 터널 미기압과 문제에 대한 실제적인 고민이 계속될 것임.

### 2. 신규 고속철도의 터널 미기압과 저감대책 방향

- 2011년부터 완전개통으로 상업운행을 시작한 일본 큐슈 신칸센의 경우에 최고운행속도가 260km/h인데 복선터널 내공단면적이 63.5m<sup>2</sup>임.
- 일본 신칸센 터널 내공단면적은 63.5m<sup>2</sup>로 도담-영천 노선의 터널들이 일본 신칸센 터널 내공단면적보다 약 2.5m<sup>2</sup>정도 크게 설계되었음(터널 내공단면적이 3.4% 차이임).
- 일본 큐슈 신칸센은 터널 미기압과 저감 후드(완충공)를 터널 입출구에 설치하였음. 터널입구 후드는 영구구조물이고 유지보수가 필요 없는 저렴한 대책임.
- 도담-영천 철도노선 기본계획의 터널들은 터널 입·출구 미기압과 저감대책이 필요함.
- 세계 최초 고속철도로 1964년도에 일본 신칸센이 개통하면서 200km/h로 운행을 시작하였음. 신칸센 터널의 내공단면적은 63.5m<sup>2</sup>를 적용하였는데, 1975년도부터 터널 내부에 콘크리트궤도를 적용하면서 터널출구 미기압과 문제가 크게 발생되어 주변 민가에 충격성 소음 및 진동의 피해를 입혀, 그 당시에 큰 사회적 이슈가 되었고, 이에 터널입구 후

드(완충공)를 적용하여 해결하였음.

- 터널 출구 미기압과의 크기는 열차운행 속도의 3승에 비례함. 도담-영천(원주-강릉) 노선에서 복선터널의 직선구간 내공단면적이  $65.74 \text{ m}^2$ 고 최고운행속도가  $250\text{km/h}$ 이면, 일본 신칸센 사례에서 알 수 있듯이 터널입구 미기압과 저감대책을 적용해야 함(일본 신칸센과 약  $2\text{m}^2(3.4\%)$ 의 근소한 터널단면적 차이임). 터널 미기압과 저감대책을 검토하기 위한 터널단면은 직선터널 단면도가 기준임.
- 도담-영천 노선의 터널 내공단면적이  $37.45\text{m}^2 \sim 39.34\text{m}^2$ 인 단선터널들도 전부 터널 미기압과 저감대책을 적용해야 함.
- 최근에 한국철도시설공단은 전체 철도건설비와 운행 중의 유지보수 비용을 절감하기 위하여 교량, 노반폭, 터널 내공단면적 등을 전부 최적설계하고 콘크리트 도상을 적용하고 있음.
- 열차 주행 시의 터널 내부의 공기압 변동량과 객실내의 이명감(ear-discomfort)은 그 동안의 다양한 터널 내공단면적에서의 현장실험으로 얻은 벽면마찰계수, 압력계수 값 등을 사용하여 수치해석적 방법으로 잘 예측하여 설계할 수 있음(영국 Alan Vardy의 ThermoTun S/W 등).
- 독일(DB)과 일본(RTRI)의 경우에 터널 미기압과 대책 적용여부에 대한 검토를 그동안 축적된 현장실험의 미기압과 실험데이터를 근간으로 한 역해석(실험데이터 dB 활용)으로 미기압과 저감대책 적용여부를 판단함.
  - 특성곡선방정식 해법이나 전산유체역학(CFD)의 수치해석 방법으로는 터널출구에서 방사되는 미기압과 최대값 크기 예측에서 오차가 매우 크고, 해석결과가 잘 맞지 않기 때문에 실험데이터를 근간으로 역해석 방법을 사용함.
- 터널 출구에서 외부로 방사되는 미기압과 폭발음을 해석하기 위한 각종 이론식이나 경험식 또는 2차원, 3차원 CFD 해석방법이 발표되고 있으나, 현재까지 실효성있게 예측을 못하여 실질적인 설계 엔지니어링에는 활용하지 않고 있음(독일, 일본 등).
- 단, 3차원(또는 준 3차원) CFD 해석방법은 상호 보완적인 해석방법으로 활용하고 있음.
- 2005년, 독일 ICE Nurember-Ingolstadt 신선의  $300\text{km/h}$  시운전 시험에서 콘크리트 궤도와 터널단면적  $92\text{m}^2$ 터널에 대하여 미기압파가 발생되지 않는다는 2003년도의 독일 DBR의 이론 경험식 해석결과로 독일은 미기압과 대책을 세우지 않았지만, 실제로는 대단한 폭발음이 발생함.
- 이후, 독일 DBR도 일본철도총합기술연구소(RTRI)와 같은 현장시험 데이터 뱅크에 의한 역해석 방법으로 터널 미기압과 환경영향 평가방법을 교체함.
- 국내에는 최근까지 설계 엔지니어링을 할 수 있는 터널 미기압과 한계치가 터져 나오는 현상이 없기 때문에 현장시험 데이터 뱅크를 구축할 수 없었고, 초저주파 특성에 대하여 검증되지 않은 센서로 터널 미기압파를 계측한 사례도 있음.

- 한국철도기술연구원은 일본 RTRI에서 17년 동안의 신칸센 현장시험 데이터 बैं크를 입수하여 역해석 방법으로 터널 미기압과 환경영향 평가를 수행하고 있음.

표 2.5.1 철도 선진국의 터널 미기압과 환경영향 평가 방법

용역 주체	국내 고속철도	적용된 평가방법	철도시설공단에 제출된 용역보고서
일본, Japan Railway Technical Services	경부고속철도 환경영향평가 수행	현장시험 데이터 बैं크에 의한 역해석 방법	The final report of micro-pressure wave study for the Seoul-Pusan high-speed railroad project (1994.12) <sup>1</sup>
독일 DBR	호남고속철도 환경영향평가 수행	현장시험 데이터 बैं크에 의한 역해석 방법	Micro-pressure waves Korea For DB International (2007.08)

※ 주 1: (사)대한터널협회, 1995.08, “경부고속철도 제8공구, 제11공구 터널내 공기압 해석보고서”의 사전 국외 검증용역으로 제출됨

- 터널 설계 엔지니어링에서 터널 미기압과 환경영향 평가가 신뢰할 수 있는 수준으로 수행되기 위해서는, 해석 S/W가 미기압과 폭발음이 터져 나오는 현장시험데이터와의 비교로 사전 검증이 되어야 됨(각종 문헌에 현장시험 데이터들은 많이 공개되어 있음).
- 예를 들어 250km/h급 신선에 대해서는 180km/h ~ 260km/h의 속도범위에서 4개 속도에 대하여 짧은 터널, 중간 터널, 장대 터널을 대상으로 검증이 되어야 설계 엔지니어링 해석 S/W로서 검증될 수 있음. 현재까지 터널 설계 엔지니어링에서 검증이 안된 해석 S/W가 사용된 사례가 있음.
- 일본(RTRI, JR-East, JR-West)과 독일(DBR), 프랑스(SNCF) 등은 민간용역업체가 아닌 철도전문연구기관에서 터널 미기압과 환경영향평가 설계 엔지니어링과 터널 미기압과 저감 대책(후드 대책) 마련을 수행하고 있음.
- 철도 선진국에서 민간용역업체가 아닌 철도전문연구기관에서 터널 미기압과 환경영향평가 설계 엔지니어링과 터널 미기압과 저감 대책 마련을 수행하고 있는 이유는 다음과 같음.
  - 철도전문기관만이 다년간에 걸친 현장시험 수행으로 시험데이터 확보가 가능하고, 이론적 방법으로는 완전히 규명되지 않은 미기압과를 현장시험데이터뱅크에 의한 역해석 방법으로 예측이 가능함
  - 터널단면적 최적화, 콘크리트케도 적용 등의 철도시스템 통합 엔지니어링이 가능하기 때문에 사전대책 마련이 가능
  - 터널주행 열차모델 주행시험기가 있어야 터널 입구 후드 등의 미기압과 저감대책을 마련할 수 있음(철도전문기관만이 보유하고 있음).
- 일본(RTRI, JR-East 연구소, JR-West 연구소)과 독일(DB 연구소) 등의 철도전문

기관의 기술 확보 현황

- 터널 미기압과 환경영향평가 역해석 S/W 자체 보유함
- 터널 미기압과 저감대책인 후드 등의 특허기술권리 자체 보유함
- 터널주행 열차모델 시험기 자체 보유함
- 터널 설계 엔지니어링에 참여하고, 기술이전 수행함

○ 국가출연기관인 한국철도기술연구원(KRRRI)의 기술 확보 현황

- 터널 미기압과 환경영향평가 S/W인 MPIS-BED Code 자체 보유함
- 터널 미기압과 저감대책 특허기술권리 자체 보유함(개인이 특허 보유하면 징계함)
- 터널주행 열차모델 시험기 자체 보유함

표 2.5.2 각국의 콘크리트궤도 터널에 대한 미기압과 저감대책 적용현황

구분	대만	독일	일본	한국
노선	타이페이 ~ 카오슝	니른베르크 ~ 인골스타트 신선	큐슈 신칸센	중앙선 도담-영천 11공구
운행속도	300km/h	300km/h	260km/h	250km/h
표준 복선터널 단면적	90m <sup>2</sup>	92m <sup>2</sup>	63.5m <sup>2</sup>	66.01m <sup>2</sup>
궤도구조방식	콘크리트궤도	콘크리트궤도	콘크리트궤도	콘크리트궤도
차량 전두부	초유선형	유선형	초유선형	-
미기압과 저감대책	적용함	적용함	적용함	적용함
적용기준 검토	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 일본 신칸센의 산악터널 설계 시공 표준</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 일본 신칸센의 산악터널 설계 시공표준</li> <li>• 독일 기준(터널 출구 50m에서 20Pa)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 일본 신칸센의 산악터널 설계 시공표준</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 일본 신칸센의 산악터널 설계 시공표준</li> </ul>
적용방법 검토	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 연장 3km이상 터널에는 후드를 전부 설치</li> <li>• 연장 3km이하 터널에는 후드를 민가가 있는 지역만 설치</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 실질적으로 독일기준과 일본기준은 거리에 따라 산정하면 같은 값의 허용기준임</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 터널 미기압과 환경영향 평가와 허용기준을 적용하여 후드 설치</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 터널 미기압과 환경영향 평가와 허용기준을 적용하여 후드 설치</li> </ul>

표 2.5.3 250km/h급 고속철도에 대한 터널 미기압과 저감대책 적용현황

구분	독일	일본		한국
노선	Karlsruhe ~ Basel 신선	도호쿠 신칸센 신선 <sup>1</sup> 나가노 신칸센 (조예츠 신칸센)	큐슈 신칸센	중앙선 도담-영천 11공구
설계최고속도	250km/h	260km/h (245km/h)	260km/h	250km/h
표준 터널단면적	62m <sup>2</sup>	63.4m <sup>2</sup> , 65m <sup>2</sup> , 66m <sup>2</sup>	63.5m <sup>2</sup>	66.01m <sup>2</sup>
궤도구조방식	콘크리트궤도	콘크리트궤도 (발라스트궤도)	콘크리트궤도	콘크리트궤도
차량 전두부	유선형	초유선형	초유선형	미정
미기압과 저감대책	적용함	적용함	적용함	적용함
적용 기준	일본과 독일 허용기준	일본 신칸센의 산악터널 설계시공 표준		
적용 방법	- 터널 미기압과 환경영향 평가와 허용기준을 적용하여 후드 설치			

※ 주1: “도호쿠 신칸센 신선 “은 모리오카에서 신아오리까지의 노선연장 178.4 km로 2010년도에 완공

- 특히, 도담-영천 신선의 단선터널 내공단면적이 40m<sup>2</sup>이하이기 때문에 미기압과가 매우 크게 발생될 것임(단선터널: 16개소, 복선터널: 28개소).
- 고속철도에서 콘크리트궤도를 적용한 터널인 경우는 터널 연장이 길어질수록 압력과 압력기울기가 더욱 증폭이 되어 터널 출구에서 미기압과가 매우 크게 발생됨.
- 250km/h급 고속철도에서는 표 2.5.2과 표 2.5.3에서 각국의 고속열차 전두부 특성에서 알 수 있듯이 열차의 주행저항을 최소화하여 운영비용을 최소화하는 것 뿐만 아니라, 터널 미기압과를 저감시키기 위해서도 가능한 초유선형의 고속열차를 투입하고 있음. 미기압과의 최대값은 열차속도의 3승에 비례하여 증가하고, 콘크리트궤도에서는 터널 연장이 길어질수록 매우 크게 증가하기 때문에, 열차 전두부를 초유선형으로 길게 적용하면 터널 진입시 첫 번째 압력과의 압력구배 상승을 어느 정도 지연시켜 약 10% 내외로 추가적으로 미기압과를 저감시킬 수 있음.

### 3. 공기역학적 성능평가 도구에 대한 기술수준

가. 전산유체해석을 위한 해석프로그램

#### (1) STAR-CCM+

- STAR-CCM+는 영국의 CD-Adapco에서 개발한 범용 CFD해석코드임. 복잡한 비정렬 격자에 필요한 높은 수준의 정확성을 가진 산업용 유한체적법(FVM) CFD code로써 현재 검증된 상용코드 가운데 효과적인 수치 해석 도구 중의 하나로 공학적 설계 및 개발 사이클에서 요구되어지는 계산에 많이 사용되고 있음.
- STAR-CCM+는 정상 및 비정상 상태 시뮬레이션에서 가장 높은 수준의 정확성을 달성하기 위하여 최신 기술의 독자적인 수치 기법을 사용하며, 뒤틀린 사면체 격자를 포함하여 격자의 형식과 질에 가장 민감하지 않은 특성을 가지고 있음.
- STAR-CCM+는 범용 CFD코드중 최초로 Moving Mesh기법을 도입하여 움직이는 물체의 모사가 가능하도록 하였으며, 복잡한 비정렬격자들에 필요한 높은 수준의 CFD코드로 엔지니어링 설계 개발사이클에 의해 요구되는 다양한 해석에 적용이 가능하여 해석에 소용되는 시간과 효율성에 장점을 갖고 있음.

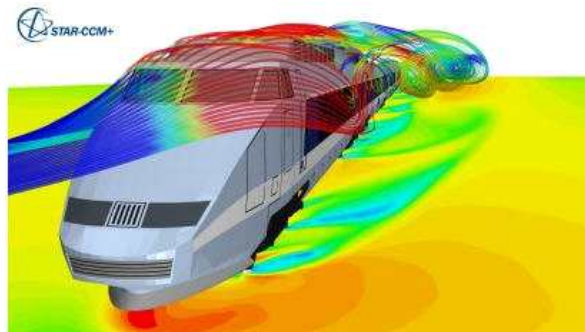


그림 2.5.1 STAR-CCM+해석결과 예시

#### (2) CFD-FASTRAN

- 프랑스 ESI에서 개발한 소프트웨어로 Moving body, Missile launch, 고기동과 staging, store separation 들을 포함한 여러 복잡한 공기역학적 문제들의 해석이 가능한 FVM 코드임.
- Multiblock 형성이 가능하고 정렬, 비정렬 격자계 및 혼합격자계 구성이 가능하며, Moving Body 모델을 통하여 움직이는 물체의 해석이 가능함.
- CFD-FASTRAN의 가장 큰 장점중 하나로 physical phenomena 혹은 사용자에 의한 prescribed moving 문제들을 해석할 수 있으며 6DOF(six-degree-of-freedom) motion으로 Gravity, point force(ejector/small rocket), thrust 등을 고려할 수 있음.

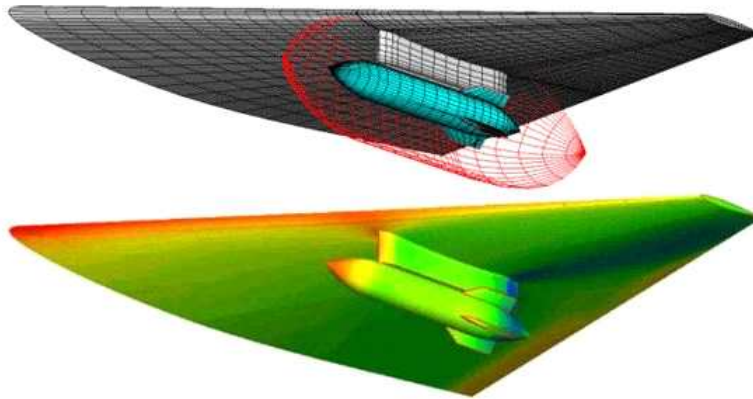


그림 2.5.2 STAR-CCM+해석결과 예시

### (3) OPEN FOAM

- OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation)은 영국 Imperial College의 Henry Weller 박사와 Hrvoje Jasak 박사에 의해 개발된 FVM 전산유체역학 (CFD: Computational Fluids Dynamics) 프로그램이며, GNU GPL (일반 공중 사용 허가서: General Public License)를 부여 받은 OpenFOAM은 2004년부터 소스코드가 무료로 공개되어 있음.
- OpenFOAM은 다른 공개 소스코드 전산유체역학 프로그램과는 달리 객체지향적 성격이 뚜렷한 C++ 언어를 바탕으로 작성되었기 때문에 사용자가 프로그램을 수정하거나 프로그램의 변형 없이 새로운 내용을 추가할 수 있음은 점에서 큰 장점을 가져 전산유체역학 연구자들의 참여와 관심 속에 꾸준히 발전하고 있는 모델임.
- OpenFOAM의 특징으로는 C++ 언어의 객체지향적인 특징을 활용하여 프로그램 내부에서 지배방정식을 표기하는 방식을 일반적인 수학 방정식이 표기되는 방식과 유사하게 구현함으로써 사용자는 모든 공학적 라이브러리들을 모두 이해하지 못하더라도 원하는 해석 방식에 해당되는 표준 솔버를 찾아 바로 사용하거나 표준 솔버를 기반으로 하여 수정이나 추가를 원하는 부분만 소스코드를 변화시켜 컴파일 후 프로그램으로 사용할 수 있음.

### (4) CFX

- ANSYS CFX는 CFX-4와 CFX-TASCFlow를 기반으로 발전한 FVM CFD (computational Fluid Dynamics)해석 코드임.
- CFX의 특징은 pressure-based coupled algebraic multigrid solver로 수렴성이 뛰어나며, CFD를 해석하기 위한 선형방정식의 정확한 해를 빠르게 구할 수 있고, coupled multigrid의 탁월한 해석기법을 제공하고 있음.

- 현재는 FLUENT와 같은 ANSYS Workbench내에 소속되어 기능적인 부분에서 중복되는 부분이 있음.

#### (5) AcuSolve

- AcuSolve는 Altair사에서 개발된 프로그램으로 Galerkin/ Least-Squares(GLS) FEM 기반으로 하며 GLS는 높은 수준의 정확도를 가지면서도 안정된 공식화 방법으로 압력을 포함한 모든 변수에 동일 차수 nodal 보간을 사용함.
- Moving Mesh기법을 포함하고 있으며, LES 및 RANS 모델을 포함하는 난류모델을 보유하고 있음.

#### (6) FLUENT

- FLUENT는 1980년대에 개발되어 미국 FLUENT사를 거쳐 현재 ANSYS사에 소속되어 있는 해석코드임.
- 터널분야의 해석에는 1999년 스위스의 HBI사에 의하여 해석도구로 소개되었고 많은 수의 프로젝트에 적용되고 있음.
- FLUENT는 비압축성(low subsonic)에서 압축성(supersonic and hypersonic) 및 천음속(transonic) 유동 등 유동의 전 영역을 해석할 수 있는 유한체적법(FVM) CFD전용 Solver임. FLUENT는 완벽한 격자 유연성(mesh flexibility)과 솔루션에 기반한 적응 격자(mesh adaption)기법과 연계한 다양한 수치해석 모델을 제공함.
- 이동하는 열차 움직임 해석이 가능한 Moving Mesh 및 Dynamic Mesh 적용이 가능하며, 압축성 유체 해석 및 점성, 비점성 유체해석이 가능함.

#### 나. 성능평가방법의 적용성

- 열차가 고속으로 터널진입시 발생하는 압력파와 터널내 유동장 해석에 사용된 국내외 다양한 전산유체해석 모델(소프트웨어)을 검토한 결과 유한체적법(finite volume method; FVM)을 기반으로한 해석모델을 많이 사용하는 것으로 나타났으며 각 전산유체해석 모델의 구성특성에 따라 분석조건 및 경계조건을 적용하여 분석이 수행된 것으로 나타남.
- 다양한 전산유체해석 모델에 적용된 분석특징중 가장 중요한 특성인 유한체적법(finite volume method; FVM)과 열차거동 모사에 사용되는 Sliding Mesh와 Dynamic Mesh 방법의 특성을 조사함.

(1) 유한체적법(Finite Volume Method)

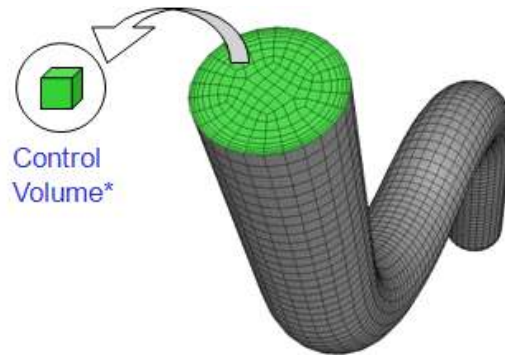
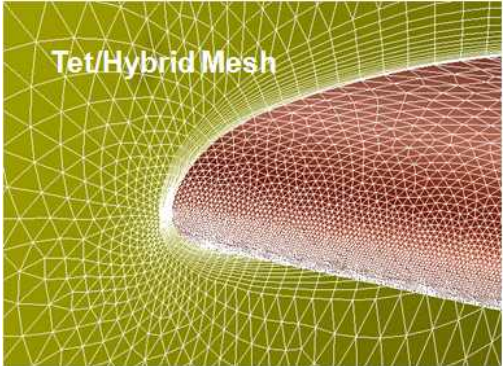
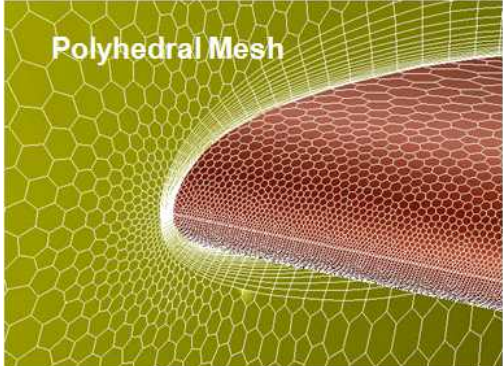


그림 2.5.3 유한체적법의 개념

- 유한체적법(Finite Volume Method)을 통한 3D 전산 유체해석의 경우 단위 체적에 대한 질량과 관성량 및 에너지 등의 보존법칙을 적용한 미분방정식 풀이를 적용하게 되며 전체 해석 공간에 대한 단위체적을 어느 정도로 분해하느냐가 해석의 정확성을 결정하는 주된 요소가 됨.
- 전산 유체해석에서는 단위체적을 기하학 적으로 Grid 혹은 Mesh로 표현하게 되며 Mesh 형상의 품질에 큰 영향을 받게 되며 열차형상 구현시 해석을 위한 격자의 수가 과도하게 증가되는 경우 해석시간이 증대되어 되므로 해석시간이 증대되는 것을 효율적으로 처리할 수 있는 다양한 격자 형상이 적용될 수 있는 해석모델을 검토하기로 함.

표 2.5.4 격자형태별 형상특성

Tet/Hybrid Mesh	Polyhedra Mesh
	

- 전산유체 해석에서는 유체에 대한 지배방정식(Governing Equation)을 적용하여 연산을 수행하게 되며 이러한 지배방정식은 도메인을 구성하고 있는 유한 체적 요소 별로 적용되어 각각의 유한 체적요소 내 지정되어 있는 유체역학적 변수들의 해를 구하게 됨. 아

래의 수식은 지배방정식의 예를 나타냄.

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV}_{\text{Unsteady}} + \underbrace{\oint_A \rho \phi \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A}}_{\text{Convection}} = \underbrace{\oint_A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\mathbf{A}}_{\text{Diffusion}} + \underbrace{\int_V S_\phi dV}_{\text{Generation}}$$

- 또한 난류모델, 다상모델, 연소-화학 반응 등 물리적 모델의 추가 적용에 따라 체적요소  
소에 반영되는 변수들이 추가되고 따라서 요구되는 처리 용량 등도 증가하게 됨에 따라  
하드웨어 사양을 고려하여 효율적인 해석모델을 적용하여 분석을 수행함.

## (2) Sliding Mesh / Dynamic Mesh

- Sliding Mesh는 해석상의 이동 또는 회전하는 물체의 주변 거동을 모사하기 위한 방법  
으로 터널의 열차주행 모사에 적용이 가능함. Sliding Mesh가 개발되기 이전에는 풍동  
실험법을 이용하여 모사하였는데, 이러한 방법으로는 터널내 열차거동과 같은 피스톤  
운동을 비정상상태로 해석하는 것이 불가능함.
- Sliding Mesh의 개념은, 해석 도메인을 정적인 부분과 동적인 부분으로 구분하여 각기  
다른 운동속성을 지정하는 것으로 직선 방향의 운동을 구현하는 방법임. Sliding Mesh  
는 해석에 따라 Mesh 구조가 고정되어 있기 때문에 필요한 데이터 영역에 비하여 많은  
수의 격자를 구성하여야 하는 단점이 있음.

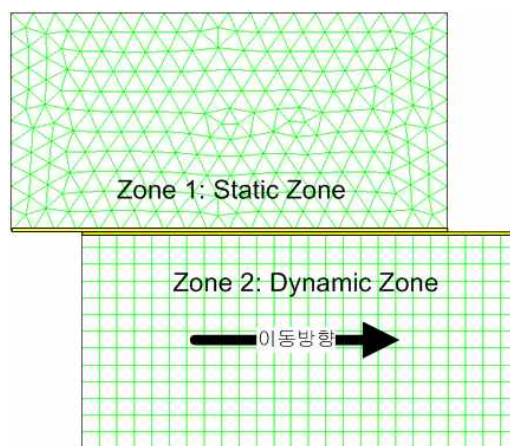


그림 2.5.4 Sliding Mesh의 개념

- Dynamic Mesh는 Sliding Mesh기법을 발전시킨 개념으로, 도메인 내 형상변화에 따라  
Mesh 구조를 실시간으로 변화하는 기능으로 보다 정확한 계산 및 직선운동 이외의 다  
양한 움직임을 구현 할 수 가 있고, 벽체로 사용되는 Wall 등 경계조건의 움직임에 따

라 주변 격자망의 node 좌표를 이동하는 것으로 Sliding Mesh에 비하여 보다 자연스러운 움직임이 가능함.

- 터널내 열차거동 모사에 있어서는 터널 내 열차주행 분석의 경우 터널의 입출구부에 다양한 형상의 적용 및 별도의 구속조건이 없이 외기의 free flow를 적용하므로 고속 열차의 터널 진입 시 발생하는 현상을 분석하기에 적합한 격자 변형 기법임.

### (3) HPC(High Performance Computing) H/W 활용기술수준

- 3차원 공기역학적 성능평가는 열차의 이동 및 구조물에 대한 3차원 모델링을 수행해야 하며 계산영역의 구조가 복잡한 경우 해석을 위해서는 매우 많은 격자를 형성해야 해석 결과의 오차를 줄일 수 있음.
- 해석과정에서 계산영역(geometry) 생성과 격자생성에 많은 시간이 소요됨. 계산영역의 격자수가 많아질수록 격자의 생성과 계산에 필요한 메모리 환경 및 긴 계산 시간이 소요되며, 필요한 메모리가 4GB~8GB이상으로 증가하게 되면 일반 PC 운영시스템으로는 운용하기가 어렵다.
- 전산유체역학 해석과정에서 대용량의 계산영역의 해석을 위해 클러스터 컴퓨터를 사용함. 클러스터 컴퓨터란 초고속, 대용량의 수치 연산을 위하여 하나의 CPU 또는 하나의 컴퓨터만으로 수행하기 불가능한 해석을 위해 다수의 CPU 또는 다수의 PC급의 컴퓨터를 고속의 네트워크로 연결하여 슈퍼컴퓨터의 연산처리 능력에 준하는 계산속도를 구현한 컴퓨터를 말함.

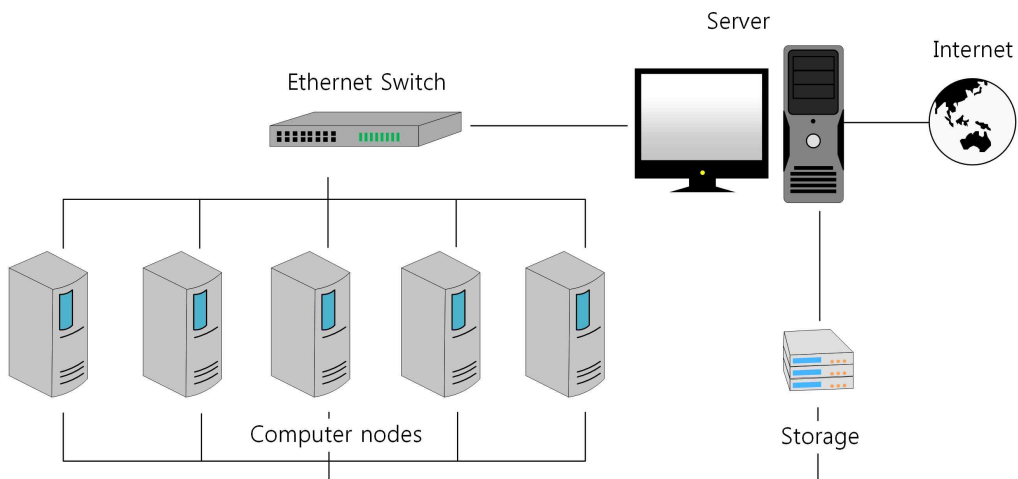


그림 2.5.5 클러스터 시스템 개요

- 고급 연산 문제를 해석하기 위해 클러스터 컴퓨터를 사용하는 것을 고성능 컴퓨터(High Performance Computing, HPC)라고 하며 최근에는 테라플롭스 이상의 규모를 HPC에

사용되는 컴퓨터를 구분하는 기준으로 사용하고 있음.

- 대용량의 계산영역이나 고급 연산 문제 해석을 위해서는 이러한 클러스터 시스템을 구축하여 활용해야 하며 이러한 전산유체역학 해석의 비중이 높아짐에 따라 내부 네트워크를 활용한 클러스터 시스템을 직접 구축하거나 고성능, 고가의 장비 구축의 어려움을 해결하기 위해 클라우드를 이용한 클러스터 시스템을 이용하는 사례가 높아지고 있음.
- 클러스터 시스템 구축시 고가의 장비구축에 대한 비용절감을 위해 클라우드 서비스 기반을 이용한 클러스터 시스템을 제공하는 업체가 늘어나고 있으며 국내에서는 국가기관인 한국과학기술정보연구원(KISTI)에서 연구목적으로 HPC를 구성하여 활용하고 있음.
- 클러스터 컴퓨터의 운영 및 병렬계산에서 하드웨어 구성과 네트워크 구성만큼 중요한 것 중 하나가 안전한 저장임. 데이터의 안전한 저장을 위하여 두 개 이상의 하드디스크에 해석시 계산된 데이터를 동시에 저장하는 미러링(mirroring) 구성과 갑작스런 정전으로 인한 데이터 손실에 대비한 UPS(무정전전원장치)를 구성할 수 있음.

표 2.5.4 국내에서 이용가능한 KISTI의 HPC

	Kisti			
	TACHYON II		GAIA	
	SUN B6275	SUN B6048	IBM p595	IBM p5
Rpeak	300 TFLOPS	24 TFLOPS	5,888 GFLOPS	30.7 TFLOPS
Core	CPU수 25408	CPU수 3008	CPU수 640	CPU수 1536
Memory	76.8TB	6TB	2,772GB	8,704GB
HDD	1061TB	207TB	63TB	336TB
Network	-	-	-	-

- 전산유체역학 해석과정에서 클러스터 시스템의 사용은 전산유체해석에 사용되는 프로그램의 분할된 부분들을 분담하여 동시에 처리하는 병렬처리를 하기 위함으로 사용되는 프로그램은 병렬처리를 위한 알고리즘을 제공해야 사용자가 클러스터 시스템을 사용할 수 있음.
- 또한, 병렬해석은 전산유체해석에 사용되는 모델의 병렬처리 알고리즘 특성에 따라 하드웨어 규모가 증가함에 따라 시스템 성능이 비례적으로 증가하지 않기 때문에(Minsk's conjecture : P개의 프로세서들을 사용한 병렬 프로세서에서 프로세서들 간의 정보 교환을 위한 통신 오버헤드 때문에 시스템 성능은 P배가 아닌, 최대 log2P배까지만 개선)

사용되는 모델의 병렬 알고리즘에 따른 효율적인 하드웨어 구성이 필요하며 다음과 같은 요소를 고려하여 시스템을 구성해야 함.

- 속도 향상에 대한 척도 : N개의 프로세서를 가진 클러스터 컴퓨터와 단일프로세스 시스템의 처리속도 비교
- 효율 : 투자비용에 따른 효과를 분석
- 중복성 : 응용 프로그램을 클러스터 컴퓨터에서 처리하는 경우 수행되는 연산들의 수와 단일프로세스 시스템에서의 연산들의 수 비교
- 시스템 이용율 : H/W resource들이 어느 정도 효율적으로 사용되는지를 분석
- 병렬처리의 질 : 병렬처리가 어느 정도 효과적으로 이루어졌는지를 나타내는 척도

#### (4) 해석모델 선정에 있어 고려해야할 요소

##### ○ 열차거동 모사

- 다양한 열차의 속도에 따른 터널 입구부에서 발생하는 압력파(micro pressure wave)해석을 위해서는 터널입구부에 압력파의 특성을 경계조건으로 모사하는 방법으로는 한계가 있어 실제 열차거동을 모사할 수 있는 Sliding / Dynamic Mesh를 이용한 모델 선정이 필요함

##### ○ 3차원 형상 반영

- 터널 입구부에서 발생하는 압력파는 터널입구부의 형상, 열차 전두부의 형상, 후드와 같이 Open구의 단면적과 위치에 따라 그 특성이 다르게 나타나므로 이러한 구조적인 형상을 고려할 수 있는 3차원 형상을 구현할 수 있는 모델 선정이 요구됨.

##### ○ 터널내 압축파의 거동해석을 위한 점성모델

- 고속으로 터널에 진입하는 열차에 의해 발생하는 압력파의 경우 터널입구의 초기 압력변화 특성을 분석하는데는 비점성(Inviscid) 모델을 사용해도 큰 영향이 없는 것으로 분석되나, 해석시간과 취득데이터에 따라 점성모델의 적용성을 고려해야할 필요가 있음.
- 만일, 터널내부의 압력파의 거동을 해석하고자 하는 경우 점성모델의 적용이 중요한 요소로 적용될 수 있으며 점성모델에 따라 신뢰성의 차이가 발생함으로 점성모델 선정시 신중함 검토한 필요할 것으로 판단됨.

##### ○ 압축성 기체에 의해 발생하는 압축파의 모사를 위해 이상기체 밀도 방정식 적용

- 열차가 터널 입구 진입시 발생하는 압축파는 공기의 압축성을 해석할 수 있는 이상기체 밀도 방정식 분석이 필수적이며 이상기체를 분석하기 위해서는 지배방정식에 에너지 방정식이 포함되어야 함.
- 압축성 기체 해석시 에너지 방정식을 해석해야 하며 에너지 방정식의 경우 높은

정밀도의 변수가 필요함으로 배정밀도 변수를 적용하여 정확한 수치 해석이 수행할 수 있음.

○ 대규모 해석을 위한 병렬처리 기능

- 복잡한 터널 및 열차 구조적 형상에 대한 모델링과 열차주행 특성 모사를 위해 많은 격자수의 적용이 불가피하며 격자수 증가에 따른 메모리 사용량과 해석시간도 비례하게 됨.
- 특히, 압축성 유체의 해석을 위해서는 해석시 시간간격이 매우 조밀하게 설정되어야 하는데, 이것은 많은 하드웨어 자원을 필요로 하며, 해석시간의 증가로 이어진다. 따라서, 터널내 압축과 모사를 위해서는 해석모델에 병렬처리를 위한 알고리즘이 제공되어야 함.

## 6절 SWOT 분석

### 1. 내부역량 및 외부환경

#### 가. 외부 환경 분석

##### (1) 기회 요인

- 국내 200km/h급 이상의 고속철도 건설 수요가 지속적으로 계획되어 있으며, 현재 원주-강릉선이 건설 중에 있으며, 중앙선, 동해선, 중부내륙철도, 서해선 등이 계획 중이거나 설계 중에 있음. 이러한 신규철도에서 터널이 차지하는 비중이 평균 50% 이상임.
- 국가 교통정책 패러다임이 녹색교통으로 전환되며, 녹색육상교통의 대표인 철도에 대한 투자 확대 전망
- 철도 건설비 건전화 추세로 철도터널 내공단면적이 지속적으로 최소화되고 있음
- 열차하중 문제와 유지보수 문제로 터널내 궤도도상이 발라스트 궤도에서 콘크리트 궤도로 바뀌면서 미기압과 문제가 크게 대두됨
- 터널내 수직갱이나 사갱 등의 설치개소 증가로 미기압파를 저감시킬 수 있지만 큰 공사비의 증가로 귀결됨.
- 터널 미기압과 저감대책 기술이 국내 영업 철도에 아직 실현된 사례가 없고, 이론적 및 실험실 수준의 연구만 수행하고 있으므로 선진국과의 기술 격차가 크지 않아서 지속적인 투자와 연구개발 노력을 기울인다면 기술 선점이 가능함
- 터널 미기압과 저감 후드 기술은 터널 갱구에 설치되는 친환경 구조물로서 반영구적인

시설이며 유지보수가 거의 필요 없는 철도 인프라임

## (2) 위협 요인

- 경부고속철도와 호남고속철도에서 터널 미기압파가 발생되지 않을 정도의 대단면 터널을 적용하여, 터널 미기압파의 폭발음이 발생하는 철도현장이 없음
- 국내는 터널 미기압파 현장시험과 최적설계의 경험부족 상황에서 터널 미기압파 전문가가 거의 없어서 최근 원주-강릉선, 중앙선 등의 터널 실시설계에서 미기압파 환경영향평가 오류를 바로잡는데 어려움이 있음.
- 국내에 터널 미기압파 허용기준이 없어서 신규 고속철도 설계 시마다 일관된 기준 적용이 되지 않고 있음.
- 현재 설계중인 중앙선, 동해선, 중부내륙철도의 단선터널 단면적은 40m<sup>2</sup>로서 철도 선진국에서 설계 유래가 없는 제일 작은 터널 단면적으로 250km/h와 200km/h로 운행계획을 설정하여 짧은 터널에서도 터널 미기압파의 폭발음이 매우 크게 터져 나올 상황임
- 이러한 단선터널에서는 장대터널의 경우에 차세대 고효율 터널 미기압파 저감 후드를 설치하여도 미기압파를 저감시키는데 한계가 있을 수 있음.

## 나. 내부 환경 분석

### (1) 장 점

- 고속철도의 전국 확대, 일반철도의 고속화/복선화 추진을 통해 철도 인프라 시공 분야에서 충분한 경험 및 기술력 보유
- 차세대 고효율 터널 미기압파 저감 후드에 대한 원천기술 확보
  - 지금까지 최고성능을 가지는 있는 일본 신칸센 창문형 후드보다 철도연의 통풍관형 후드는 미기압파 저감능력이 10% 더 우수하고, 2014년에 개발된 차세대 미기압파 저감 후드(날개형 후드, 아치 슬릿형 후드, 수평 통풍관형 후드)는 22% 더 우수함. 즉, 터널 미기압파 저감율이 “통풍관형 후드”는 최대 60%, “차세대 미기압파 저감 후드”는 최대 72%까지 저감시킴(세계 최고성능).
  - 본 기술은 한국철도기술연구원에서 100% 주도적으로 개발한 원천기술임.
- 세계 최고성능의 터널주행 열차모델 주행시험기(Moving Model Test Rig)의 보유
  - 후드를 개발하고 성능검증하기 위하여 열차모델을 실제속도로 주행시켜서 터널출구에서의 미기압파 저감 성능을 파악하는 터널주행 열차모델 주행시험기(Moving Model Test Rig)의 보유가 필수적임. 자체 독자모델로 설계 및 제작한 주행시험장치이며, 2014년에 주행장치의 초고속 피스톤밸브 적용으로 최고속도 470km/h에서 최고속도 1,060km/h로 성능 업그레이드를 달성하였음. 동종 시험장치로는 세계 최고성능임.

- 터널 미기압과 저감대책 적용으로 터널내공단면적을 작게 할 수 있으므로 철도터널 건설비 절감됨 ☞ 터널 내공단면적 20%이상 축소효과 → 터널 건설비 12% 절감

## (2) 약 점

- 현재 운영중인 경부고속철도와 호남고속철도는 터널 미기압과 발생되지 않을 정도의 대단면 터널이라 터널 미기압과의 폭발음이 발생하는 철도현장이 없어서 현장시험 데이터 확보 못하고 있음.
- 국내 현장시험 데이터를 확보하지 못하여 국내 선로변 주거환경 실정에 맞는 미기압과 허용기준 정립에 어려움이 있음.
- 철도선진국의 시스템엔지니어링 기법을 받아들여 철도터널 단면적을 최소화하여 터널 건설비 건전화를 시도하고 있으나, 터널 미기압과 환경영향평가 소프트웨어의 신뢰도가 검증이 안된 툴(tool)이 사용되어 200km/h급 단선터널의 경우에는 과도하게 터널 단면적이 축소되어 있음.
- 철도전문연구기관인 한국철도기술연구원의 경우에는 최근에 신칸센 현장시험데이터 뱅크를 활용한 역해석 방법으로 터널 미기압과 환경영향 평가를 수행하고 있으나 일본 철도터널의 특성에 맞추어져 있어 타이트한 환경영향평가를 수행하는 데는 한계가 있어, 2017년도의 원주-강릉선의 시운전 시험에서 터널 연장별로 방대한 현장시험 데이터 확보가 필수적임.

## 2. SWOT 분석

- 사업의 비전, 목표 및 추진전략 수립을 위하여 외부 환경 분석 및 내부 역량분석 결과를 토대로 SWOT 분석을 실시하고 이에 대한 대응전략을 도출

<p style="text-align: center;"><b>SWOT 분석</b></p>	<p><b>강점(S)</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.철도 인프라 시공 분야에서 충분한 경험 및 기술력 보유</li> <li>2.차세대 고효율 터널 미기압과 저감 후드에 대한 원천기술 확보</li> <li>3.세계 최고성능의 터널주행 열차모델 주행시험기 보유</li> <li>4.터널 미기압과 저감대책 적용으로 터널내공단면적을 작게 할 수 있으므로 철도터널 건설비 절감됨</li> <li>5.신뢰성 높은 터널 미기압과 현장시험 기술 확보</li> </ol>	<p><b>약점(W)</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.터널 미기압과의 폭발음이 발생하는 철도현장이 없어서 현장시험 데이터를 확보 못하고 있음</li> <li>2.터널 미기압과 환경영향평가 소프트웨어의 신뢰도가 검증이 안된 툴(tool)이 사용되어 200km/h급 단선터널의 경우에는 과도하게 터널 단면적이 축소되어 있음.</li> <li>3.신칸센 현장시험데이터 뱅크를 활용한 역해석 방법으로 터널 미기압과 환경영향 평가를 수행</li> </ol>
<p><b>기회(O)</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.국내 200km/h급 이상의 고속철도 건설 수요가 지속적으로 계획되어 있음.</li> <li>2.신규철도에서 터널이 차지하는 비중이 평균 50% 이상임.</li> <li>3.철도 건설비 건전화 추세로 철도터널 내공단면적이 지속적으로 최소화되고 있음.</li> <li>4.열차하중 문제와 유지보수 문제로 터널내 궤도도상이 발라스트 궤도에서 콘크리트 궤도로 바뀌면서 미기압과 문제가 크게 대두됨</li> <li>5.선진국과의 기술 격차가 크지 않아서 지속적인 투자와 연구개발 노력을 기울인다면 기술 선점이 가능함</li> </ol>	<p><b>SO 전략</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.터널 미기압과 저감 후드 기술은 친환경 구조물로서 반영구적인 시설이며 유지보수가 거의 필요 없는 철도 인프라임</li> <li>2.풍부한 고급인력과 터널 및 구조물 시공경험을 활용하여 경제성 있는 미기압과 저감 대책 설계 및 시공 가능</li> <li>4.우수한 연구인력과 설계사, 시공사를 활용한 세계적 수준의 연구결과 도출</li> <li>5.개발될 기술의 국내현장 적용을 통한 검증을 통한 해외 건설시장 진출을 위한 기술력 확보</li> </ol>	<p><b>WO 전략</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.풍부한 고급설계인력의 적극적 활용을 통해서 터널 미기압과 관련 설계기술 향상과 관련 기준 정비</li> <li>2.기술개발에 있어서 후발이지만 그 차이가 미소할 뿐 아니라 현장에 적용할 수 있는 실증적 연구가 가능함</li> <li>3.고급인력이 적극적으로 참여하여 관련 기술의 실용화와 이를 위한 관련기준의 정비가 가능</li> <li>4.국가적인 R&amp;D 사업 추진을 통한 관련 실용기술 확보</li> <li>5.고성능 경량재료를 적용한 고내구성 시설물 개발로 기술 차별화 및 경쟁력 확보</li> </ol>

위협(T)	ST 전략	WT 전략
<p>1.터널 미기압과 전문가가 거의 없어서 그동안의 미기압과 환경영향평가 오류를 바로잡는데 어려움이 있음.</p> <p>2.국내에 터널 미기압과 허용기준이 없음.</p> <p>3.현재 설계중인 중앙선, 동해선, 중부내륙철도의 단선터널 단면적은 40m<sup>2</sup>로서 철도 선진국에서 설계 유래가 없는 제일 작은 터널 단면적임.</p> <p>4.이러한 단선터널에서 장대터널의 경우에 차세대 고효율 터널 미기압과 저감 후드를 설치하여도 미기압과를 저감시키는데 한계가 있을 수 있음.</p>	<p>1.본선 테스트 베드 구축을 통한 안전성 검증 및 불안감 해소</p> <p>2.발전된 시공기술과 터널 및 각종 구조물의 건설경험을 활용하여 공용중 설치 가능한 신공법 개발</p> <p>3.신재료와 신공법을 적용하여 경제성이 확보되는 프로젝트의 실현</p> <p>4.요소기술별 기술 검증을 통한 안전성 확보</p> <p>5.우수한 연구인력과 풍부한 시공경험을 통해 시스템엔지니어링 기술 보완</p>	<p>1.관련기준을 확실하게 마련하여 안전성 확보에 최선의 노력</p> <p>3.테스트 베드의 시험평가를 통한 터널 미기압과 저감 대책 경험확보 및 노하우 축적</p> <p>4.적용한 경제성이 우수하면서 안전성이 확보될 수 있는 연결방안 도출</p> <p>5.기 개발된 기술을 적극 활용하고 실용화 기술 개발에 초점을 맞추어 세계최고 성능의 미기압과 저감대책 마련</p>

### 3. 미래시장 대응전략

- 열차의 고속화가 지속적으로 추진되고 있는 현재의 상황을 감안하여 볼 때, 터널 미기압 문제는 더욱 중요하게 대두될 것으로 예상됨. 국내에 고속열차가 도입되는 초기에는 관련 기술의 부족으로 필요이상의 대단면이 적용되어 건설된 사례가 많았으나, 지속적인 해외 자료수집과 기술개발로 인하여 지속적으로 단면적이 감소하는 추세에 있음.
- 터널의 미기압과는 아직까지 완전히 이론적으로 규명되지 못한 상태로, 현장 기상상태나 기압조건 등에 대해서도 관련이 있는 것으로 추정되나, 이에 대한 연구는 부족한 상태임
- 따라서 본 연구를 통하여 열차가 운행되는 터널에 대한 미기압과 발생을 지속적으로 모니터링하고, 이에 대한 조건의 상관성을 규명함으로써 향후 고속화, 소단면화에 대응하는 기술개발이 가능할 것으로 판단됨
- 본 연구관련 기술의 성취는 현재 일본 및 독일에 편중되어 있는 기술의존성 및 선도능력을 배양하여 국내 철도기술 발전에 이바지하고, 미래의 선도기술로서 세계시장에 대응 가능함

### 3장 경제성 분석 및 사전타당성 검토

#### 1절 경제성 분석

##### 1. 경제성 분석 서언

- 1899년에 우리나라에서 처음으로 경인선(노량진-제물포)이 개통된 이후, 2004년에는 세계에서 5번째로 시속 300km의 KTX 고속철도가 개통되어 서울-부산 간 운행시간은 2시간 10분 내외로 단축되었으며, 2010년에는 국산 기술로 제작된 KTX-산천이 상업운행을 시작함. 또한 2012년 개발된 해무는 시속 430km로 KTX 보다 100km나 빠른 차세대 고속 열차로서, 호남고속철도가 완공되는 내년 하반기부터 호남선 오송~광주 구간에서 운행될 예정으로 있음.
- 우리나라의 고속 철도 개발 기술은 세계 철도 선진국수준으로 향상되어 있으며, 친환경 대량 운송수단으로서의 철도의 역할은 앞으로 더욱 커질 것으로 예상됨. 이러한 선진화된 열차기술은 향후 기존의 저속 열차 노선의 개량 및 신선 건설 등으로 속도의 향상을 가져올 것이며, 이에 맞추어 기존 터널의 유지 보수 및 신규 터널공사 역시 증가 하게 될 것임. 2012년의 “중장기 운송전략(코레일)” 에 의하면 향후 10년간 우리나라 터널 건설 계획은 317개소개로 향후 전국적으로 철도노선의 속도향상에 따른 고속철도 시대로 진입하게 될 것임.
- 그러나 속도 증가에 따른 신속한 운송이라는 장점이면에는 소음 발생으로 인해 철도운행 주변 지역은 소음공해에 의한 환경적인 문제점이 발생할 가능성이 높을 것으로 예상됨. 고속철도가 처음 운행된 일본에서는 1975년 3월, 산요 신칸센의 개통을 위한 시운전시험에서 뜻하지 않게 터널 출구에서 미기압파에 의한 폭발음이 발생되어, 신칸센 소음에 관한 환경기준이 고시되는 결과를 초래함. 이러한 소음의 원인을 파악하기 위해 JR과 신칸센 건설국에서 조사위원회를 구성하고 실태를 파악하여 1976년도에 터널 미기압파 실태보고서를 발간함. 이는 기존의 철도 운행에서는 없었던 새로운 형태의 환경 문제로, 1995년에는 재래철도의 신설 또는 대규모 개량에서의 소음대책 지침이 발표됨.
- 터널내부로 고속열차 진입에 의하여 생성된 압축파는 터널 내·외 환경에 영향을 미치는데, 열차 내부 기압에 영향을 미쳐 승객들이 귀울림(이명) 현상을 느끼게 되며, 터널의 출구에서 충격성 소음으로 터져 나가는데, 이를 미기압파라고 함. 일본, 독일, 중국 등 고속열차 운영국가 들은 2008년 이후부터 미기압파 허용기준을 마련하고 건설단계부터 저감시설을 설계에 반영하도록 하고 있으나, 우리나라는 아직 구체적인 철도관련 소음 기준은 마련되어 있지 않은 상황임.
- 그러나, 지리적으로 산악지형이 많은 우리나라는 2012년도 현재 672개의 철도터널이 구축되어 있으며, 향후 철도의 고속화에 따른 기존 터널 개량 및 신규 터널 건설시 미

기압파에 의한 소음 및 문제점을 저감하기 위한 대책이 필요한 실정임. 철도 터널 미기압파를 저감하기 위한 대책은 여러 가지 방법이 있으나, 미기압파 저감 후드를 설치하는 것이 가장 효율적인 방법으로 알려져 있으며, 유럽, 일본, 대만 등에서도 미기압파 저감 후드를 적용한 대책을 시행하고 있음. 현재 해외 철도 운영국가들이 사용 중인 후드 형태는 일본에서 개발된 창문형 후드를 터널 특성에 맞게 변형하여 사용하고 있음.

- 현재 우리나라는 경부고속 철도와 호남 고속 철도는 터널의 단면적이 충분히 크기 때문에 열차가 고속으로 터널에 진입하더라도 미기압파의 크기가 미비하여 운행상의 문제가 없는 것으로 알려져 있으나, 향후 건설 될 터널들은 단면적의 크기가 작아지기 때문에, 미기압파의 영향이 클 것으로 예상됨.
- 따라서, 본 보고서에서는 지속적인 터널 증가에 대비하여 한국 철도 기술연구원이 자체 개발한 미기압파 저감 기술인 ‘철도터널 미기압파 저감용 차세대 후드’에 대한 경제성 분석을 통해 실용화 및 향후 국내외 시장으로의 적용 가능성에 대해서 알아보도록 함. 본 보고서의 주요 분석 내용은 다음과 같다.
- 일차적으로 관련 후드 기술과의 비교 분석을 통해 본 기술의 차별성 및 향후 경쟁력 등을 분석함. 이를 위하여 자체 개발한 차세대 후드 기술과 경쟁 기술인 일본의 창문형 후드의 기술 격차 및 수준을 정량적으로 비교하여 향후 경쟁 우위 가능성을 분석 함. 이를 바탕으로 기존 터널(후드 비적용) 대비 후드 적용시의 터널 건설 비용 절감액 산정을 통한 후드 기술의 경제성 분석을 시행하도록 함.

## 2. 철도터널 미기압파 저감용 차세대 후드 기술성 평가

### 가. 후드 기술 개요

- “철도 터널 미기압파 차세대 저감 후드”는 열차가 고속으로 터널 내에 진입할 때 터널 출구에서 발생하는 미기압파를 저감하기 위해, 터널 입구에 후드를 설치하는 기술로서 경쟁 기술인 일본의 후드(창문형 후드)에 비해 저감 기능이 향상된 차별화된 후드기술 임.
- 미기압파는 시속 200km이상의 고속 열차가 터널에 진입할 때 발생하며, 객차 안의 승객들이 귀울림과 같은 불쾌감을 느끼게 되고, 터널 출구에서는 큰 소음과 함께 열차가 운행하는 주변지역에 진동현상을 일으키게 됨. 미기압파는 저주파로 방음벽 설치 등으로는 차단이 불가능하며, 터널출구에서 최대 반경 100미터 거리에 있는 가옥의 문과 유리창을 심하게 진동시켜 파손시킬 정도로 환경적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있음.
- 기본적인 미기압파 저감대책으로는 터널 단면적을 확대하거나 터널 진입 시 열차속도의 감속 등이 있으나, 과도한 건설비용이나 저속 운행에 의한 고속 열차의 장점 및 운행 정시성 등의 서비스 관점에서 문제가 생길 수 있음. 이러한 방법은 터널 단면적을 작게

설계 하거나, 속도 향상에 장애 요인으로 작용하게 되기 때문에 터널입구에 후드를 적용하는 것이 미기압파에 대한 효과적인 저감대책이 될 수가 있음. 아래 그림 3.1.1은 통풍관형 후드가 터널 입구에 설치된 모습이며, 터널 연장, 터널 단면적, 열차의 단면적, 열차의 속도 등 미기압파에 영향을 미치는 요인들의 특성에 따라 후드의 길이와 통풍관 개수들을 적절히 조정할 수 있음.



그림 3.1.1 미기압파 저감용 통풍관형 후드

- 후드 본체의 지붕에 일렬로 형성된 통풍관은 고속 열차의 진입에 따라 발생한 압축파를 반사, 간섭시키는 기능을 수행하여 결과적으로 후드 본체 내에서 발생한 압축파가 감소되어 터널 내부로 전파되기 때문에 터널 출구에서의 미기압파를 저감하도록 설계되어 있음.

#### 나. 후드 관련 기술 개발 및 적용 현황

- 철도 터널 미기압파 저감 후드는 형태에 따라 창문 형태의 개구부를 갖는 창문형 후드와 통풍관 구조로 되어있는 통풍관형 후드로 나뉘어진다. 창문형 후드는 일본철도종합연구소에서 개발한 이후 신칸센 노선의 450개소 이상에 설치되었으며, 최근에는 유럽의 독일(2012년)과 프랑스(2010년)에도 적용됨.
- 반면, 통풍관형 후드는 1997년부터 한국철도기술연구원에서 개발을 시작하여, 1999년에 특허 출원을 하였으며, 실험 결과 미기압파 저감 성능면에서 일본의 창문형 후드보다 10% 이상 앞서는 것으로 나타났으며, 후드를 적용하지 않은 터널과 비교 시 최대 56%의 저감 효과를 나타냄.
- 현재, 고속철도를 건설하는 국가들은 기존의 발라스트 궤도 대신 콘크리트 궤도를 사용하고 있으며, 이로 인해 미기압파가 발생하게 되어, 국제 수준의 미기압파 기준에 맞추어 소음 저감 대책을 적용하고 있음. 국내에서도 고속철도 설계 시 최소 터널내공단면적과 콘크리트 슬라브 궤도 적용으로 심각한 소음에 의한 환경문제를 야기 시킬 수 있는 터널 미기압파에 대한 저감대책이 필요하게 됨. 따라서, 국내·외적으로 철도의 고

속화와 이에 따른 터널 보수 및 건설이 증대 되면서 미기압과 저감 대책은 더욱 강화되고 후드의 사용은 지속적으로 수요가 있을 것으로 예상됨.

- 후드 적용이외에도 가능한 미기압과 저감 대책으로는 수동 제어 방법과 능동 제어 방법이 있음. 수동적 제어 방법으로는 연속한 터널을 슬릿 및 슬릿 커버가 부착된 션터로 연결하는 방법(연속한 터널에 개구부를 적용하여 스노우 션터로 연결함으로써, 터널 앞쪽에서 발생한 압력파를 연속터널 중간에 위치한 스노우 션터의 개구부에서 처리), 통풍공 터널에 의한 방법(소단면 수직 통풍공을 철도터널내부에 일정 간격으로 적용함으로써, 터널내의 풍압변동량을 저감시켜 승객의 이명감을 줄여주고, 터널 미기압과 저감), 차량의 구조를 변경하는 방법(열차 전두부 형상의 최적화로 터널 진입 시 터널 내 공기 압축시간 지연효과), 차량 단면적에 의한 미기압과 저감 대책(열차 단면적을 축소함으로써, 터널 단면적 확대 효과), 터널 벽면에 완충재를 설치하는 방법(발라스트와 같은 완충재를 터널의 전체 길이에 걸쳐서 설치)등이 있음. 그리고 능동 제어 방법으로는 터널 내에 워터 커튼을 설치하는 방법, 터널내에 물방울을 분사하는 방법, 터널 입구에 송풍기를 설치하는 방법, 그리고 터널 출구에 능동소음제어 우퍼 스피커를 설치하는 방법 등이 있음.
- 상기 방법들 중 미기압과 저감 후드(열차 진입에 의해서 발생하는 압축파 전면의 압력 구배를 처음부터 완화)를 통한 대책이 현재 가장 효율적인 방법으로 알려져 있으며, 적용 터널 출입구 지형, 시공성, 민가분포 상황 등 주변 환경에 맞추어 선택적으로 사용할 수 있는 장점 등으로, 현재 유럽, 일본, 대만 등에서도 미기압과 저감 후드를 적용하고 있음. 다음은 주요 고속 철도 운영 국가들의 후드 적용 사례에 대해서 요약 함.

#### (1) 우리나라

- 현재 국내의 경부/호남 고속철도는 터널 진입속도 대비 터널 내공단면적이 매우 크게 건설되어 있기 때문에 “터널 미기압파” 라는 폭발음 발생이 없는 상황이나, 최근 국·내외 터널 설계 추세가 내공 단면적 축소를 통한 건설비 절감, 유지관리의 효율성을 고려한 콘크리트케도 공법 적용 그리고 열차의 고속화 추세로 터널 미기압과 발생의 가능성이 커지고 있는 만큼 이에 대한 소음 저감 대책 마련이 시급한 실정임. 특히, 운행속도 200km/h 이상의 고속철도에서 터널 미기압과 저감 후드의 설치 대책은 시공비가 저렴하며, 궁극적으로 최적설계의 최소 터널 단면적에서 적용되기 때문에 최선의 터널 건설비 절감 방법이 될 수 있음.
- 2013년에 한국철도기술연구원에서 자체 개발한 “한국형 터널 미기압과 저감 후드” 기술을 호남고속철도 400km/h급 증속구간인 우산터널 시점에 국내 처음으로 기술 이전 및 설치를 완료 함, 그러나 1999년도에 국내특허 등록된 한국형 통풍관형 후드는 국내특허만 출원하여 기술수출이 불가능한 상태임.

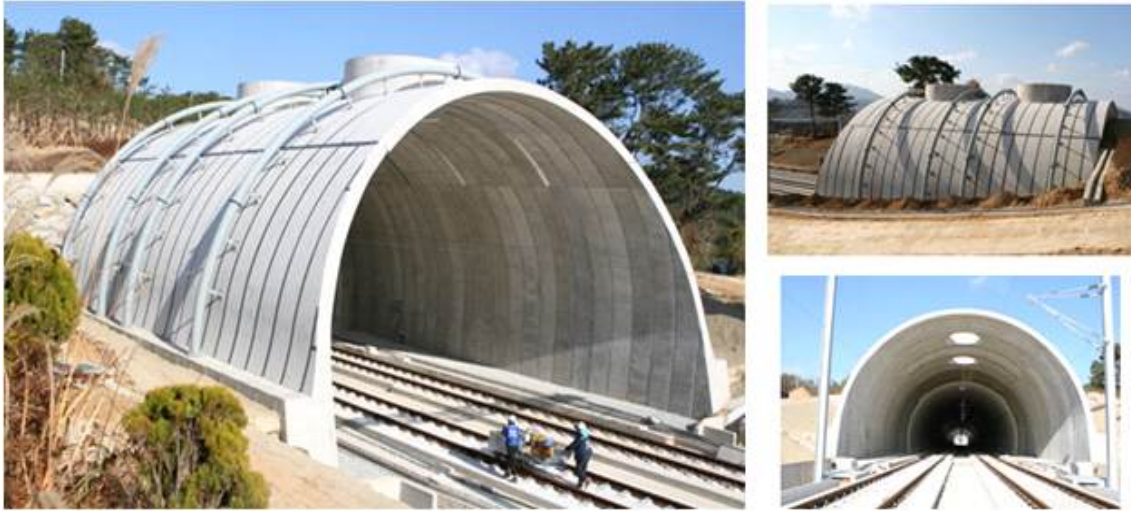


그림 3.1.2 우산터널 미기압과 후드 적용 사례

- 반면에, 일본, 독일, 중국 등 고속열차 운영국가 들은 2008년 이후부터 미기압과 허용기준을 마련하고 건설단계부터 저감시설을 설계에 반영하고 있음.

표 3.1.1 고속 열차 운영 국가들의 터널 미기압과 저감 대책 실행 현황

구 분	경부고속	호남고속	중앙선	일본	독일	중국
터널단면적(m <sup>2</sup> )	107(복선)	96.7(복선)	66(복선) 40(단선)	63.4~66 (복선)	62(단선)	48.6(단선)
운행속도(Km/h)	300	300	250	254~260	250	200
허용기준	없음	없음	없음	있음	있음	있음
저감 시설 설치	없음	없음	없음	있음	있음	있음

## (2) 일본

- 최소 터널단면적과 콘크리트 궤도를 제일 먼저 적용한 일본 신칸센 철도에서 1975년 3월 오카야마-하카타간 신칸센 노선 개통과 함께 터널의 출구에서 충격성 굉음이 발생하고, 갱구 부근의 가옥의 창과 문이 심하게 흔들리면서 소음을 발생시키는 새로운 환경문제가 발생함. 이를 계기로 1975년 이후에 지속적으로 “터널입구 미기압과 저감 후드”에 대한 연구를 진행하여 창문 형태의 개구부를 갖는 “창문형 후드”를 개발하여 신칸센 450개소 이상의 터널 입구에 설치하여 사용하고 있으며, 독일, 프랑스 등의 유럽과 중국 등은 일본에서 개발한 “창문형 후드”를 사용하고 있음. 일본의 미기압과 저감 후드는 약 40년 동안의 연구개발 및 개량으로 지적 재산권 상에서 독점적 지위를 차지

하고 있음.



그림 3.1.3 일본 산양 신칸센의 터널 미기압과 저감 후드

- 터널 건설비를 절감하기 위하여, 최소 터널 내공단면적 적용 시에 발생하는 터널 미기압과의 환경 소음/진동 문제는 설치비가 저렴하고 유지보수가 용이한 후드 대책을 채택하고 있음(일본 산악터널 설계 시공표준). 또한, 최근에는 후드의 측면에 길이방향을 따라 개폐 조절가능용 창문을 설치하여 미기압과의 특성에 따라 현장에서 조정이 가능하도록 설계되어 있어, 터널 통과 지역과 주행속도에 따라 발생하는 미기압과를 현장시험을 통해 계측하고 결과를 이용하여 창문의 개폐 위치와 크기를 변경할 수 있는 구조적 특징을 가지고 있음.

### (3) 독일

- 고속철도의 Nuremberg-Ingolstadt 신선에서 2005년 12월에 ICE S, ICE 3 고속열차로 열차속도 300km/h로 시험운행 중 연장 7.7km인 Euerwang 터널과 연장 7.26km인 Irlahül 터널 갱구에서 심각한 미기압과 문제가 발생하여 터널출구로부터 1km 떨어진 가옥의 문과 창문이 흔들리는 현상이 발생 함. 이는 발라스트 궤도로 건설되도록 계획되어 있었으나 터널공사가 완공된 후에 콘크리트 궤도로 설계가 변경되어 문제가 발생한 것이었다. 이후 콘크리트 도상인 터널에서 미기압과 문제가 심각함을 인식하고, ICE 신선에 적용할 터널 미기압과 저감 후드를 선정하고 적용하기 시작함. 아래 그림은 독일에서 사용 중인 일본의 창문형 후드임. 창문의 위치를 상부 쪽으로 이동하여도 공기 역학적 성능은 차이가 없기 때문에, 일본의 터널 미기압과 저감 후드를 터널 특징에 맞도록 후드 형태를 변형하여 사용하고 있음.



그림 3.1.4 독일의 터널에 사용되는 창문형 후드

(4) 프랑스

- 프랑스의 경우 프랑스와 스페인의 국경에 위치한 Perthus 터널에 미기압과 저감 후드가 적용되어 있음. Perthus 터널은 콘크리트 도상을 적용한 연장 8.3km의 단선병렬터널로서, 2010년 12월에 상업운행을 시작한 터널임. Perthus 터널의 양쪽 갱구에는 “창문형의 미기압과 저감 후드” 를 각각 2개소씩 설치함. 프랑스는 국토의 대부분이 평야지대이지만 국경근처의 산악지대 철도터널에는 터널 내공단면적 최적화와 더불어, 터널출구 미기압과를 저감시키기 위하여 터널입구 후드를 적용하고 있음. 아래 그림에서 보듯이, 일본 신칸센 터널 미기압과 저감후드를 약간 변형시킨 창문형 후드 디자인으로서, 창문의 위치를 측면에서 상부쪽으로 이동시킨 디자인을 갖고 있음을 알 수 있음.



그림 3.1.5 프랑스의 터널에 사용되는 창문형 후드

(5) 중국

- 중국의 최고속도 200km/h의 일반철도 신선에 설치된 터널 미기압과 저감 후드는 일본 신칸센의 창문형 후드를 설치하였고, 200km/h급 신선과 300km/h급 신선에 터널 미기압과 저감 후드를 광범위하게 적용하고 있음. 2013년도에는 시속 160km 급 일반 철도의 터널에 천장에 통풍공이 설치된 후드를 적용하기도 함. 중국 역시 터널의 특징에 맞게 측벽 또는 상부에 창문의 위치에 대한 디자인을 변경하여 사용하고 있음.



그림 3.1.6 중국의 터널에 사용되는 창문형 후드

(6) 대만

- 대만 역시 콘크리트 궤도 채택으로 터널 미기압과 발생하기 때문에 저감대책으로 3km 이상의 터널과 터널연장 3km 이하인 경우에도 터널갭구 주변에 민가가 있는 경우에는 미기압과 저감후드를 설치하고 있음. 아래 그림은 대만 고속철도에 적용된 미기압과 저감후드의 사진으로서, 터널후드는 터널 단면적의 1.5배로 설계하였으며, 길이는 최소 20m이상으로 함. 적용된 미기압과 저감 후드는 2개의 통풍관이 설치된 후드의 형태를 갖고 있음.



그림 3.1.7 대만 고속철도의 터널 미기압과 저감 후드

○ 아래 표에 각국의 후드 기술 및 적용 현황을 요약 함.

표 3.1.2 해외 철도 운영국가들의 후드 적용 현황

국가명	후드기술(특징)	미기압파 기준 적용 현황
한국	통풍관형 (일본 기술보다 10% 이상 기능 향상)	없음
일본	창문형 (처음으로 상용화 하여 다른 국가에서 사용 중)	자체 기준 : 50 pa(128db) (50 pa : 사람의 고막에서 통증을 느끼기 시작)
독일	일본 기술 적용(터널 특징에 맞게 개조)	자체 기준: 20 pa(120db) (20 pa : 사람의 고막에서 고통을 느끼기 시작)
프랑스	일본 기술 적용(터널 특징에 맞게 개조)	자체 기준
중국	일본 기술 적용(터널 특징에 맞게 개조)	일본 기준
대만	일본 기술 적용(터널 특징에 맞게 개조)	자체 기준

다. 차세대 후드 기술 수준 및 경쟁력

(1) 기술 동향 및 수준

○ 최근 전 세계적으로 고속철도의 도입이 증가하고 있으며, 터널 건설시 국제 수준에 맞도록 미기압파를 저감하는 대책이 채택될 것으로 예상됨. 미기압파 저감기술은 여러 가지가 있으나, 터널 미기압파 저감 후드를 이용한 대책이 가장 효율적인 대책으로 알려져 있으며, 현재 일본, 유럽, 대만 등의 고속 철도에도 미기압파 저감 후드 기술이 적용되어 있음. 한국철도기술연구원은 2014년 10월에 고효율 차세대 터널 미기압파 저감 후드 원천기술을 개발 하여 표준형 후드 크기에서 미기압파 저감성능을 65% 이상 향상

시켰으며 이는 세계 최고성능임. 아래 그림은 현재 개발된 후드 기술들의 저감 성능을 비교 한 것으로서, 일본의 창문형 후드는 최대 50%저감 효과를 보이는 반면, 통풍관형 후드는 최대 60%의 저감 효과를 보이고, 최근 개발된 차세대 모델은 최대 72%의 저감 효과를 나타냄으로써, 일본의 후드 보다 22%의 저감 향상 효과를 보이고 있음. 또한, 차세대 미기압과 저감 후드는 모양에 따라 날개형 후드, 아치 슬릿형 후드, 수평 통풍관형 후드의 3가지 모델로 개발되어, 향후 터널의 특성에 맞게 제작 설치될 수 있음은 점에서 기술의 차별화 및 경쟁력에서 일본을 앞서고 있음을 알 수 있음. 아래 그림은 차세대 후드 기술 대비 일본의 창문형 후드의 미기압과 저감 성능에 대한 기술 수준 차이를 나타낸 것임.



그림 3.1.8 한국과 일본의 후드 성능 비교

- 본 기술은 한국철도연구원에서 자체 개발한 초고속 열차모델 주행 시험기를 이용하여 미기압과 저감 성능 테스트를 완료하였으며, 이를 토대로 터널 길이/단면적별, 열차 속도별 최적 설계를 완료함.
- 차세대 후드를 기준으로 각 기술간 최대 저감 성능 비교 시 통풍관형 후드는 차세대 후드의 약 83%, 그리고 일본의 창문형 후드는 차세대 후드 대비 약 70%의 기술 수준을 나타내고 있음. 아래 그림에 각 후드별 기술 간 수준의 범위를 비교함.

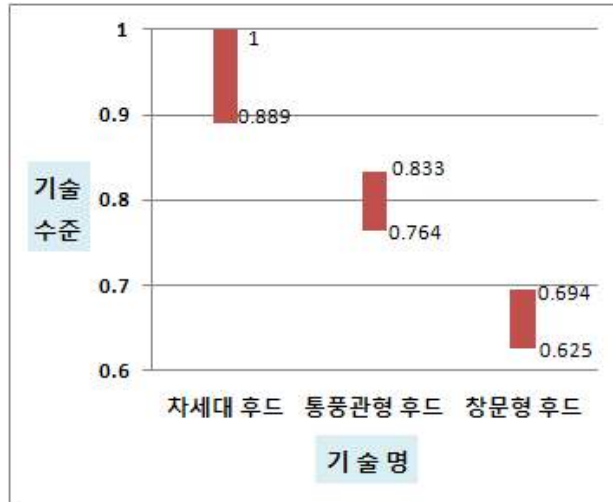


그림 3.1.9 후드 기술 간의 수준 격차

## (2) 기술의 상용화

- 철도 터널 미기압과 저감 후드는 고속철도용 터널에 적용할 용도로 개발 되었으나, 열차의 속도, 터널의 길이와 단면적에 따라 확장하여 적용 가능할 것으로 판단됨. 따라서 향후 고속 철도용 터널 이외에도 준 고속 철도 터널 또는 민가 지역을 통과하는 터널 등에 대해서도 효율적으로 적용이 가능할 것으로 예상됨.
- 상용화 실적을 보면, 2013년도에 3개 터널에 기술을 이전하여 이 가운데 호남고속철도 400km/h급 증속구간 우산터널에 설치 완료 하였고, 중앙선 도담-영천 고속철도 11공구 터널의 4개소는 포스코 건설이 설계에 반영하여 2017년 완공예정이며, 중앙선 도담-영천 고속철도 2공구 2개소는 SK건설이 설계에 반영하여 2017년 완공 예정으로 있음. 또한 중앙선 도담-영천 노선 기타설계구간의 단선터널에는 터널 미기압과 저감 후드 10개가 한국철도시설공단 설계사양으로 반영(14.10.25.)되어 사업비 예산반영 중이며 특히 기술료 자문 중(1개 소당 오천만원)에 있음.
- 한국의 통풍관형 후드는 1999년에 국내 특허출원을 하였으나, 1년 이내에 국제특허를 출원하지 못하였기 때문에, 현재 국제특허 출원이 불가능하여 기술수출은 할 수 없는 상황임. 그러나 차세대 후드의 국제 출원(2014년에 미국, 유럽, 일본, 중국에 특허출원 완료)으로 향후 기술 수출(이전) 및 일본과의 경쟁에서 우위를 점할 수 있을 것으로 판단됨.

## 라. 차세대 터널 미기압과 후드의 저감 효과

- 국내 철도시장은 고속철도의 전국운행을 목표로 기존 노선의 유지/보수 및 신규노선 건설이 동시에 이루어지고 있으며, 고속철도망의 전국적인 확대로 터널 건설 건설시 터널

미기압과 저감 후드 설치 또는 다른 소음 저감 대책이 필요한 실정임.

- 국내에서 운행되는 경부고속철도와 호남고속철도에서는 대단면의 철도터널을 적용하여 그동안 터널 미기압과 문제에 관심을 가지지 않았지만, 현재 설계중인 도담-영천 간 중앙선, 동해선, 이천-충주 철도건설 등 국내 대부분의 철도건설에서 터널의 최소 내공단면적과 콘크리트 궤도를 적용하게 되는데, 이러한 조합의 경우에 터널출구에서 미기압 파라는 충격성 환경소음·진동이 크게 터져 나오는 문제점을 수반하고 있어 이에 대한 실질적인 저감 대책이 필요한 실정임. 2005년 이후 유럽과 일본, 중국, 대만 등은 신규 고속철도는 발라스트 도상에서 콘크리트 도상으로 바뀌어 개통되고 있는데, 콘크리트 도상의 공기역학적 특성 때문에 터널궤구에 미기압저감 후드를 설치하고 있음.
- 운행속도 200km/h 이상의 고속철도에서 후드를 설치하는 터널 미기압과 저감대책은 궁극적으로 최적설계의 터널 단면적에서 적용되기 때문에 효과적인 터널 건설비절감 방법임. 철도건설이 완공된 후에 저감대책을 적용할 경우 열차운행 안전성, 지장물 이설, 매몰비용 추가, 산악지형 조건 등으로 공사비가 약 5~6배 증가하게 됨. 현재 우리나라에서의 고속 철도 터널은 단면적이 충분히 크기 때문에 미기압과의 영향은 없는 것으로 파악되고 있으나, 최근에 국내에서도 터널 미기압과 저감대책인 터널궤구 후드 등을 적용하는 최소의 터널 내공단면적을 최적 설계안으로 제안하는 상황임.

#### (1) 후드 미적용시의 미기압과 수준 분석

- 향후 건설되는 터널의 미기압과에 의한 영향을 파악하기 위해 한국철도기술연구원에서 환경영향 평가 프로그램 (MPIS-BED)을 사용하여 도출된 결과는 다음과 같다. 실험에 사용된 가정 사항으로 고속 열차는 3가지 종류(KTX-산천 고속열차, EMU-200 고속열차, EMU-250 고속열차) 이고, 궤도 구조는 콘크리트 슬라브 궤도, 그리고 단선 터널 내공단면적은 39.34m<sup>2</sup>임. 그리고 미기압과 허용기준은 터널 출구 20m에서는 일본 기준(50Pa 이하)과 터널 출구 50m에서는 독일 기준(20Pa 이하)을 적용함.
- 아래 실험 결과에서 보듯이, 향후 건설될 고속 열차의 속도가 200km 이상인 점을 고려할 때, 터널 연장에 상관없이 모든 터널에서 미기압과가 허용기준을 초과하는 것으로 나타나, 적절한 미기압과 저감대책이 필요한 것으로 나타남.
- KTX-산천 고속열차를 적용한 경우
  - 터널 연장이 길수록 미기압과가 허용기준을 초과하는 열차의 터널 진입속도가 높아지는 현상을 보였으며, 연장이 7km 이상은 185 km/h, 그리고 1km 이하에서는 216 km/h에서 허용 기준을 초과 함.
  - 전체적으로 허용 기준을 초과하는 열차 속도는 185km/h-216km/h 로서, 기존 터널이 개량되는 경우에는 중국의 예에서 보듯이 시속 200km/h 이하의 진입속도를 갖는 터널에서도 미기압과 저감 대책이 필요한 것으로 예상됨.

표 3.1.3 터널 연장별 미기압과 허용 기준 초과 진입속도 비교

터널 연장	터널 미기압과 환경영향 검토결과	터널 미기압과 저감대책 (후드 등)
0.2km ~ 0.95km	터널 진입속도 216 km/h 부터 미기압과 허용기준 초과	필요함
3km	터널 진입속도 201 km/h 부터 미기압과 허용기준 초과	필요함
7km 이상	터널 진입속도 185 km/h 부터 미기압과 허용기준 초과	필요함

○ EMU-200 고속열차, EMU-250 고속열차를 적용한 경우

- EMU 고속 열차는 KTX-산천 열차보다 전두부 단면적이 상대적으로 크기 때문에, 미기압과가 발생하는 열차의 터널 진입속도가 KTX-산천 열차 속도보다 15km-25km 낮은 것으로 나타났으며, 연장이 7km 이상은 175 km/h, 그리고 1km 이하에서는 195 km/h에서 허용 기준을 초과 함.
- 전체적으로 허용 기준을 초과하는 열차 속도는 175km/h-195km/h 로서, 기존 터널이 개량되는 경우에는 시속 200km/h 이하의 진입속도를 갖는 터널에서도 미기압과 저감 대책이 필요한 것으로 예상됨.

표 3.1.4 터널 연장별 미기압과 허용 기준 초과 진입속도 비교

터널 연장	터널 미기압과 환경영향 검토결과	터널 미기압과 저감대책 (후드 등)
0.2km ~ 0.95km	터널 진입속도 195 km/h 부터 미기압과 허용기준 초과	필요함
3km	터널 진입속도 187 km/h 부터 미기압과 허용기준 초과	필요함
7km 이상	터널 진입속도 175 km/h 부터 미기압과 허용기준 초과	필요함

- 향후 신설 터널 건설 및 기존 터널의 개량 등으로, 한국형 미기압과 허용 기준의 제정에 맞추어 미기압과 저감 기술 또는 후드 설치를 통한 구체적인 저감 대책이 필요할 것으로 예상됨. 아래 결과는 터널 연장에 따른 한국형 차세대 후드 설치시의 미기압과의 변화 및 저감 효과에 대해서 요약한 내용임.

(2) 차세대 미기압과 후드 적용시의 저감 효과 비교

(가) 터널연장 1 km 미만(0.25-0.95km)

- 아래 표에서 보듯이 현 상태에서는 250km/h 급 KTX-산천 고속 열차의 터널진입 속도

가 216km/h부터 일본과 독일의 미기압과 허용 기준을 모두 초과하는 것으로 나타났으나, 차세대 후드 설치 시 최고 속도 250km/h 로 진입하여도 터널 출구에서 미기압과는 허용기준을 크게 밑도는 것으로 나타나, 후드의 저감 효과가 있음을 알 수 있음.

표 3.1.5 차세대 후드 설치시의 저감 효과 비교(KTX-산천 열차 주행 시)[단위 : Pa]

저감대책	터널 출구	열차 진입 속도				허용기준
		180km/h	200km/h	230km/h	250km/h	
현 상태	20m	28.6	38.8	59.7	78.6	216km/h에서 기준초과
	50m	11.4	15.5	23.9	31.5	
통풍관형 후드	20m	11.44	15.52	23.88	31.44	기준 만족
	50m	4.56	6.2	9.56	12.6	
차세대 후드	20m	8.58	11.64	17.91	23.58	기준의 1/2 이 하로 저감
	50m	3.42	4.65	7.17	9.45	

- 아래 그림에 터널 연장 1km 미만의 경우 KTX-산천 열차의 진입속도에 의한 해외 허용기준과 비교 하여 미기압과 저감후드의 효과를 표시 함.

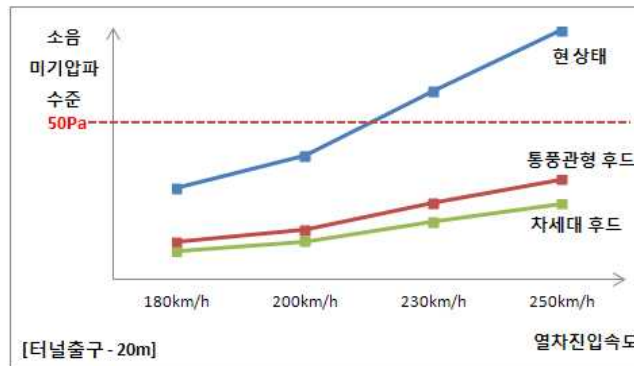


그림 3.1.10 터널연장 1km 미만(터널출구 20m, KTX-산천)

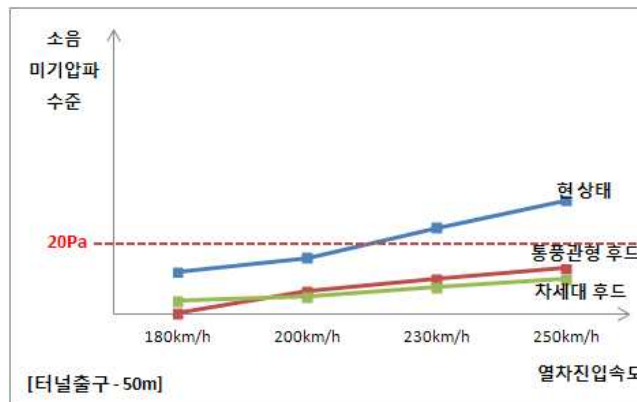


그림 3.1.11 터널연장 1km 미만(터널출구 50m, KTX-산천)

- 250km급 EMU-250 고속 열차의 경우 현 상태에서는 터널 진입속도가 195km/h부터 터널 출구에서의 허용기준을 초과 하는 것으로 나타났으나, 차세대 후드 설치 시 열차 최고 속도로 진입하여도 허용기준을 만족하는 것으로 나타났으며, 추가의 미기압과 저감 대책 없이, 한국형 고속열차 운행 시 에도 소음에 대한 문제는 없는 것으로 예상됨.

표 3.1.6 차세대 후드 설치시의 저감 효과 비교(EMU-250 열차 주행 시)

미기압과 단위 : Pa

저감대책	터널 출구	열차 진입 속도				허용기준
		180km/h	200km/h	230km/h	250km/h	
현 상태	20m	41.3	53.9	85.2	108.8	195km/h에서 기준초과
	50m	16.5	21.6	34.1	43.5	
통풍관형 후드	20m	16.52	21.56	34.08	43.52	기준 허용치에 근접하게 만족
	50m	6.6	8.64	13.64	17.4	
차세대 후드	20m	12.39	16.17	25.56	32.64	기준 허용치의 65%수준
	50m	4.95	6.48	10.23	13.05	

- 아래 그림에 터널 연장 1km 미만의 경우 EMU-250 열차의 진입속도에 의한 해외 허용기준과 비교 하여 미기압과 저감후드의 효과를 표시 함.

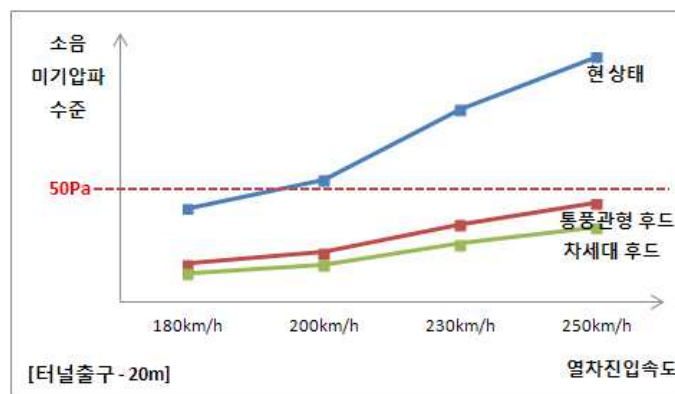


그림 3.1.12 터널연장 1km 미만 (터널출구 20m, EMU-250)

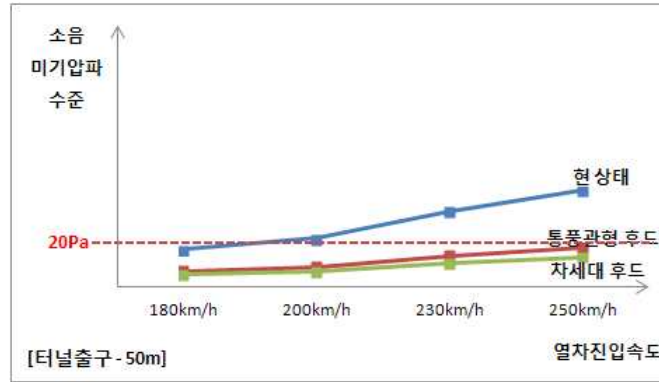


그림 3.1.13 터널연장 1km 미만 (터널출구 50m, EMU-250)

(나) 터널연장 3 km

- 현 상태에서는 250km/h 급 KTX-산천 고속 열차의 터널진입 속도가 201km/h부터 일본과 독일의 미기압파 허용 기준을 모두 초과하는 것으로 나타났으나, 차세대 후드 설치 시 230km/h의 속도로 진입 시 터널 출구에서 미기압파는 허용기준을 만족시키는 것으로 나타났으며, 250km/h의 속도로 진입 시 허용기준을 약간 초과하기 때문에 후드의 길이를 늘리거나, 터널 진입 시 약간의 감속만으로도 허용기준을 만족할 것으로 예상됨.

표 3.1.7 차세대 후드 설치시의 저감 효과 비교(KTX-산천 열차 주행 시) [단위 : Pa]

저감대책	터널 출구	열차 진입 속도				허용기준
		180km/h	200km/h	230km/h	250km/h	
현 상태	20m	28.7	47.9	112.1	194.1	201km/h에서 기준초과
	50m	11.5	19.2	44.8	77.6	
통풍관형 후드	20m	11.48	19.16	44.84	77.64	-250km/h에서 기준의 1.5배 초과
	50m	4.6	7.68	17.92	31.04	
차세대 후드	20m	8.61	14.37	33.63	58.23	-250km/h에서 기준의 1.1배 초과
	50m	3.45	5.76	13.44	23.28	

- 아래 그림에 터널 연장 3km의 경우, KTX-산천 열차의 진입속도에 의한 해외 허용기준과 비교 하여 미기압파 저감후드의 효과를 표시 함.

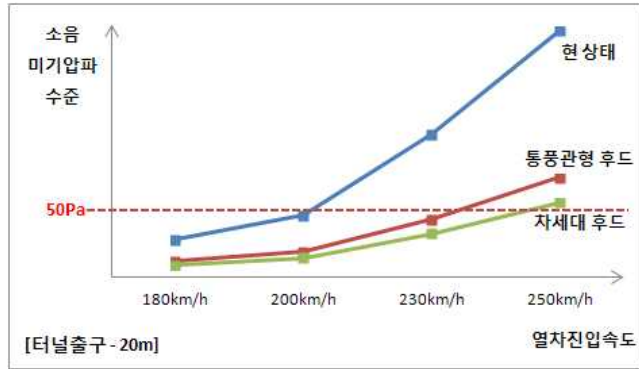


그림 3.1.14 터널연장 3km(터널출구 20m, KTX-산천)

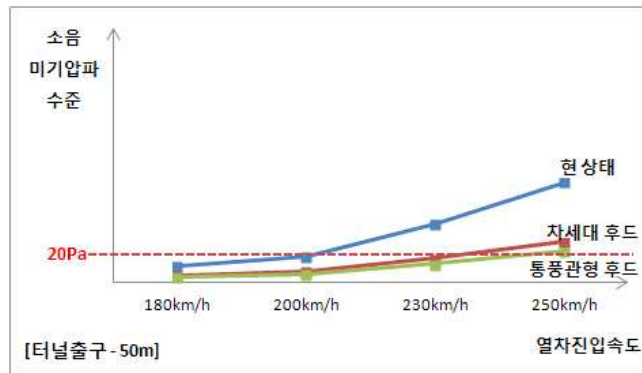


그림 3.1.15 터널연장 3km(터널출구 50m, KTX-산천)

- 250km급 EMU-250 고속 열차 주행 시, 현 상태에서는 열차의 터널 진입속도가 187km/h부터 터널 출구에서의 허용기준을 초과 하는 것으로 나타났으나, 차세대 후드 설치 시 230km/h 의 열차속도로 진입하여도 허용기준을 만족하는 것으로 나타남.

표 3.1.8 차세대 후드 설치시의 저감 효과 비교(EMU-250 열차 주행 시) [단위 : Pa]

저감대책	터널 출구	열차 진입 속도				허용기준
		180km/h	200km/h	230km/h	250km/h	
현 상 태	20m	41.5	66.6	160.0	268.4	187km/h에서 기준초과
	50m	16.6	26.7	64.0	107.4	
통풍관형 후드	20m	16.6	26.64	64	107.36	-250km/h에서 기준의 2.1배 초과
	50m	6.64	10.68	25.6	42.96	
차세대 후드	20m	12.45	19.98	48	80.52	-250km/h에서 기준의 1.6배 초과
	50m	4.98	8.01	19.2	32.16	

- 아래 그림에 터널 연장 3km의 경우, EMU-250 열차의 진입속도에 의한 해외 허용기준과 비교 하여 미기압과 저감후드의 효과를 표시 함.

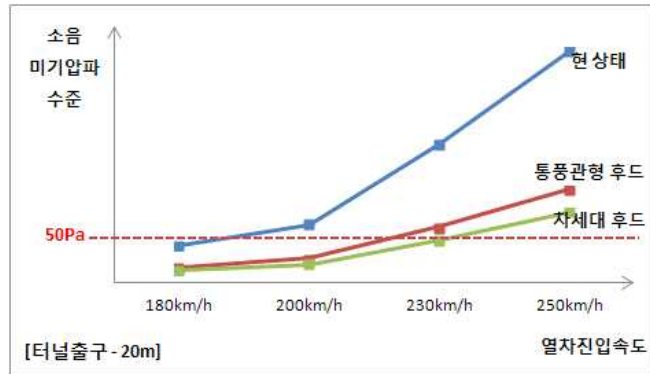


그림 3.1.16 터널연장 3km(터널출구 20m, EMU-250)

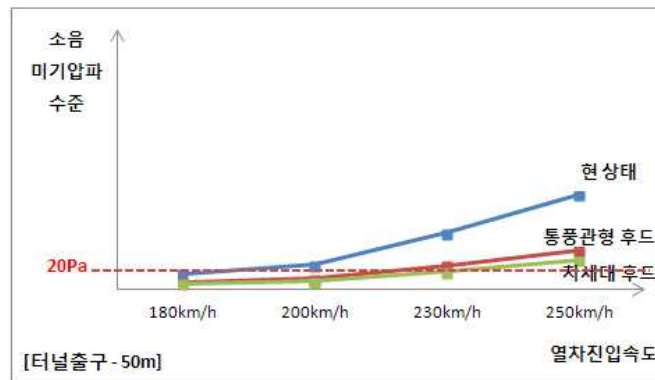


그림 3.1.17 터널연장 3km(터널출구 50m, EMU-250)

(다) 터널연장 7 km 이상

- 현 상태에서는 250km/h 급 KTX-산천 고속 열차의 터널진입 속도가 185km/h 부터 일본과 독일의 미기압과 허용 기준을 모두 초과하는 것으로 나타났으나, 차세대 후드 설치 시 200km/h의 속도로 진입 시 터널 출구에서 미기압과는 허용기준을 만족시키는 것으로 나타남.

표 3.1.9 차세대 후드 설치시의 저감 효과 비교(KTX-산천 열차 주행 시) [단위 : Pa]

저감대책	터널출구	열차 진입 속도				허용기준
		180km/h	200km/h	230km/h	250km/h	
현 상태	20m	38.2	86.6	295.4	644.1	185km/h에서 기준초과
	50m	15.3	34.6	118.1	257.6	
통풍관형 후드	20m	15.28	34.64	118.16	257.64	-230km/h에서

						기준의 5.1배 초과
	50m	6.12	13.84	47.24	103.04	
차세대 후드	20m	11.46	25.98	88.62	193.23	-230km/h에서 기준의 3.8배 초과
	50m	4.59	10.38	35.43	77.28	

- 아래 그림에 터널 연장 7km의 경우 KTX-산천 열차의 진입속도에 의한 해외 허용기준과 비교 하여 미기압과 저감후드의 효과를 표시 하였음.

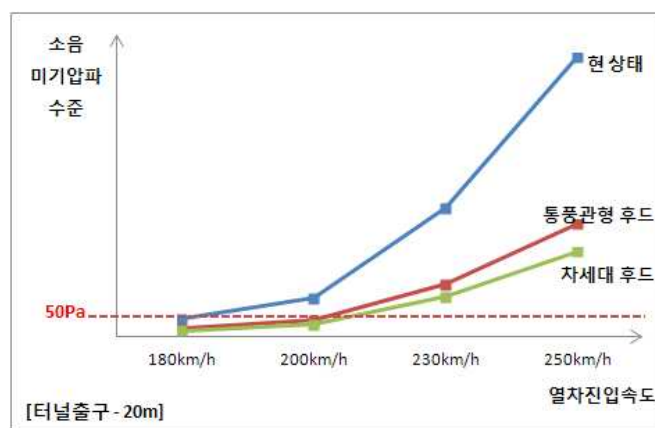


그림 3.1.18 터널연장 7km(터널출구 20m, KTX-산천)

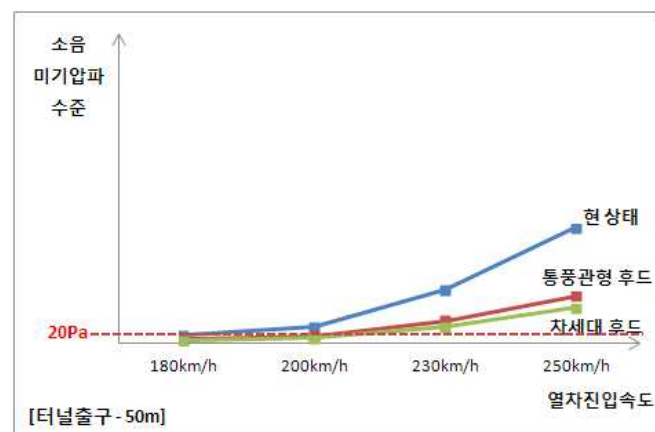


그림 3.1.19 터널연장 7km(터널출구 50m, KTX-산천)

- 250km급 EMU-250 고속 열차 주행 시, 현 상태에서는 열차의 터널 진입속도가 175km/h부터 터널 출구에서의 허용기준을 초과 하는 것으로 나타났으나, 차세대 후드 설치 시 200km/h 의 열차속도로 진입하면 허용기준을 만족하는 것으로 나타났음.

표 3.1.10 차세대 후드 설치시의 저감 효과 비교(EMU-250 열차 주행 시) [단위 : Pa]

저감대책	터널 출구	열차 진입 속도				허용기준
		180km/h	200km/h	230km/h	250km/h	
현 상태	20m	55.2	120.4	421.4	890.9	175km/h에서 기준초과
	50m	22.1	48.2	168.6	356.3	
통풍관형 후드	20m	22.08	48.16	168.56	356.36	-230km/h에서 기준의 7.1배 초과
	50m	8.84	19.28	67.44	142.52	
차세대 후드	20m	16.56	36.12	126.42	267.27	-230km/h에서 기준의 5.3배 초과
	50m	6.63	14.46	50.58	106.89	

- 아래 그림에 터널 연장 7km의 경우 EMU-250 열차의 진입속도에 의한 해외 허용기준 과 비교 하여 미기압과 저감후드의 효과를 표시 함.

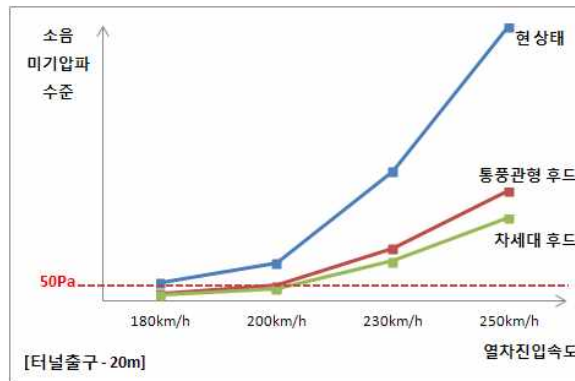


그림 3.1.20 터널연장 7km(터널출구 20m, EMU-250)

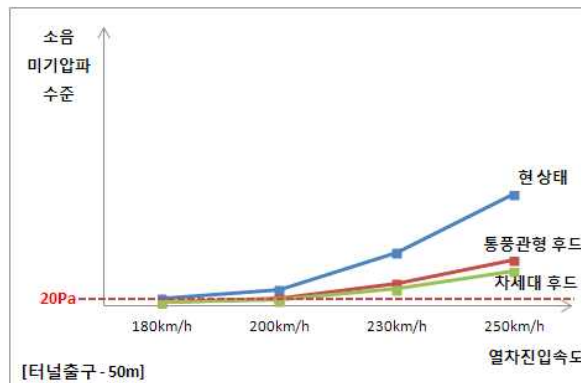


그림 3.1.21 터널연장 7km(터널출구 50m, EMU-250)

- 아래 표는 고속 열차별, 터널 연장별 미기압과 허용기준을 만족시키는 열차 진입속도에 대해서 요약한 것임. 아래 표에서 보듯이 후드를 설치하지 않았을 경우, 열차 터널 진입

시 터널 연장에 따라, 175km/h-216km/h 로 속도를 감속해야 하는 상황이 발생하게 되어, 열차의 정시 운행의 불확실성 등 고객 서비스의 문제가 발생할 가능성이 높음.

- 반면 후드를 설치하였을 경우 최소 200km/h의 속도로 진입이 가능하며, 특히 1km미만의 터널에서는 250km/h의 속도로 감속하지 않고 진입하여도 미기압과의 허용기준을 만족하게 됨. 터널 연장이 3km 이상의 중·장대 터널일 경우, 터널의 특징에 따라, 후드의 길이 연장 또는 개수 증가 등의 추가적인 저감대책을 활용하여 허용기준을 만족 시킬 수 있을 것으로 예상됨.

표 3.1.11 터널 미기압과 허용기준 만족 진입 속도 비교 [단위 : Pa]

저감대책	열차종류	터널연장	미기압과 허용기준 만족 진입속도	저감 대책
현 상태	KTX-산천	1km 미만	216km/h 미만	후드 적용 필요
		3km	201km/h 미만	
		7km 이상	184km/h 미만	
	EMU-250	1km 미만	195km/h 미만	
		3km	187km/h 미만	
		7km 이상	175km/h 미만	
통풍관형 후드	KTX-산천	1km 미만	250km/h	-차세대 후드와 동일 성능을 위해서는 후드 길이 2배 필요 -터널 주변의 지형이 협소하거나 교량이 있는 경우 후드 길이 연장에 어려움
		3km	230km/h	
		7km 이상	200km/h	
	EMU-250	1km 미만	250km/h	
		3km	200km/h	
		7km 이상	200km/h	
차세대 후드	KTX-산천	1km 미만	250km/h	- 통풍관형은 차세대 후드의 83%의 기술 수준-통풍관형 후드의 문제점 해결
		3km	230km/h	
		7km 이상	200km/h	
	EMU-250	1km 미만	250km/h	
		3km	230km/h	
		7km 이상	200km/h	

### (3) 차세대 후드의 개발 필요성

- 통풍관형 후드는 현재 국내 터널에 적용중인 기술이며, 차세대 후드는 원천 기술이 확보된 기술로서 통풍관형 후드에 비해 다음과 같은 차별적인 특징을 갖는다.

- 저감 성능의 차이 : 차세대 후드는 통풍관형 후드보다 미기압과 저감효과가 최대 12% 향상된 최신 기술임.
- 후드 설치비용의 차이: 통풍관형 후드를 이용하여 차세대 후드 성능으로 저감 효과를 향상시키기 위해서는 2배 정도의 후드 길이가 필요함.

- 운영관리의 차이: 통풍관형 후드는 후드 지붕에 여러 개의 통풍관이 배열된 구조로 기후의 영향을 받게 됨. 특히 겨울에는 눈이나, 얼음 등이 후드에 형성되어 후드의 운영/관리에 문제가 발생하는 단점이 발생하나 차세대 후드는 이러한 단점을 보완한 구조임.
- 설계/시공의 차이: 통풍관형 후드는 아치형 구조에서 상부 통풍관을 고려해야 하기 때문에 구조적 안정성 설계 및 시공에 애로사항이 있으나, 차세대 후드는 상부구조가 간단하여 설계 및 시공이 용이함.
- 터널 주변 지형을 고려한 설치상의 차이: 산악 지형 및 교량이 있는 경우 후드 길이가 짧으면서 성능이 향상된 후드를 설치하여 터널 갱구 주변 지형 및 시설물과의 간섭을 최소화 하는 미기압과 저감 기술이 필요함.
- 독자적인 기술 개발로 해외 철도 미기압과 시장 경쟁력 확보: 통풍관형 후드는 국내 특허만 출원하여 해외 기술수출이 불가능함. 그러나 차세대 후드는 일본의 기술에 비해 최대 22% 성능이 향상된 기술로서, 해외 특허 및 기술 수출을 통한 해외 시장에서의 경쟁력 우위를 점할 수 있음.
- 터널 면적의 축소에 따른 미기압과 저감 기술 향상의 필요성: 터널 건설 비용의 절감을 위해 전 세계 적으로 터널 면적은 점차 축소되고 있어, 기존 미기압과 저감 기술보다 훨씬 향상된 기술의 개발 및 적용이 필요함.

○ 아래 표에 통풍관형 후드와 차세대 후드의 차이점을 요약 함.

표 3.1.12 통풍관형 후드와 차세대 후드의 차이점

후드 종류	최대 성능	동일성능 대비 시공비용	운영/관리	설치/시공	기술 경쟁력 및 해외시장 진출	터널 단면적의 축소화
통풍관형 후드	55%	차세대 후드의 2배	기후의 영향으로 성능 및 관리상의 문제	-통풍관을 고려한 시공의 어려움 -지형에 따라 길이 연장에 어려움	해외 진출 시 경쟁력 열위	비용, 성능향상, 지형적인 문제
차세대 후드	72%	통풍관형 후드의 1/2	통풍관형 문제점 보완	통풍관형 문제 보완	독자 기술로 경쟁국인 일본 기술보다 우위	통풍관형 후드의 문제점 해결

#### 마. 시장성

- 철도터널 미기압과 저감과 관련하여 독일(2012년)과 프랑스(2010년)는 신규노선의 철도터널들에 일본 신칸센의 창문형 후드를 적용하고 일본철도종합연구소에 특허기술료를 지불하고 있음. 고속철도가 처음 도입된 일본에서는 이와 같은 소음과 관련된 기준이 환경청(현, 환경성)에 의해 1975년 신칸센 소음에 관한 환경기준이 고시되었으며, 1995

년에는 재래철도의 신설 또는 대규모 개량에서의 소음대책 지침이 발표 됨. 또한, 최근에는 고속철도가 지나가는 터널주변에서 발생하는 미기압과의 저감을 위한 시설물이 추가로 건설되었으며 고속철도를 운영하고 있는 프랑스, 독일 등에서도 미기압과 저감 시설대책을 채택하여 시행하고 있음.

- 우리나라는 아직 구체적인 철도관련 소음 기준은 마련되어 있지 않은 상황이지만 산악 지형이 많은 특성에 따라 철도노선에 2012년도 기준 672개의 철도터널이 구축되어 있어 향후 고속철도의 전국 운영에 따른 기존 터널노선 및 신규 건설 터널노선에서의 미기압과 저감을 위한 대책도 필요할 것으로 예상할 수 있음. 국내에 현재 설계중인 200km/h급과 250km/h급의 신규 고속철도의 터널이 100개소 이상으로 터널이 콘크리트 궤도 및 최소내공 단면적으로 계획되어 있어 미기압과에 발생에 따른 터널 미기압과 저감 대책이 시급한 실정임. 아래 표는 2012년 기준 철도 구축물 부설 현황임.

표 3.1.13 철도 구축물 부설 현황

2012.1.1 기준 (단위: 개소, m)

	교 량		터 널		용 벽	
	개소	연장	개소	연장	개소	연장
	3,013	410,893	672	526,263	5,880	728,168
경부선	512	36,392	61	26,262	628	117,607
중앙선	307	22,802	105	55,641	786	67,598
호남선	305	25,734	27	17,421	556	89,472
전라선	239	26,839	50	52,590	321	39,692
충북선	123	7,097	13	9,123	238	41,929
경인선	21	2,084			80	19,904
장항선	170	39,572	19	16,378	178	15,867
영동선	157	6,721	89	21,421	581	52,671
태백선	71	4,001	54	17,996	380	28,069
동해선	105	7,501	10	2,212	266	32,269
대구선	25	5,989			14	2,442
경전선	186	20,475	47	27,578	706	69,107
고속선	157	112,438	89	151,159	106	6,165
기타선	635	93,248	108	128,482	1,040	145,376

- 국내 고속철도에서 터널 출구 미기압과 저감대책이 필요한 경우는 콘크리트 궤도를 적용한 준 고속 노선의 터널로 개략 현황은 다음과 같다.(코레일 - 중장기 운송전략, 2012.08)

- 도담-영천(중앙선), 동해선, 중부내륙철도, 서해선과 같이 최고운행속도 250km/h(일부 200km/h)에서 최적설계의 최소단면으로 터널 내공단면적을 설계하는 경우(단선터널 내공단면적 40m<sup>2</sup>, 복선터널 내공단면적 65~69m<sup>2</sup>) : 완공예정 터널 수는 2024년까지

317개소로 추산되며, 이중 최소 약 100개소 이상에 미기압과 후드가 필요할 것으로 예상됨.

- 아래 그림은 상기 2012.08 코레일의 “중장기 운송전략“을 참조하여 향후 10년간 연도별 터널 준공 추이를 나타낸 것임. 2016년부터 매년 27- 46개의 신규 터널이 건설될 것으로 예상됨.

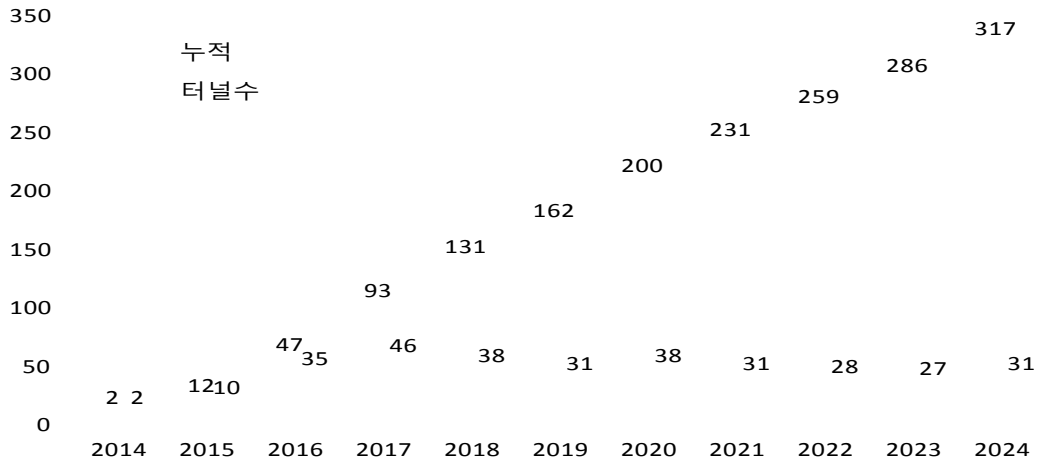


그림 3.1.22 국내의 연도별 준공터널 추이

- 상기 터널 시장 규모와 시장 동향을 고려하여 향후 후드가 적용되는 고속철도 터널 시장 전망치는 아래 그림과 같다. 2016년부터 매년 10개 이상의 터널에서 미기압과 저감용 후드의 설치가 필요한 것으로 예상됨.

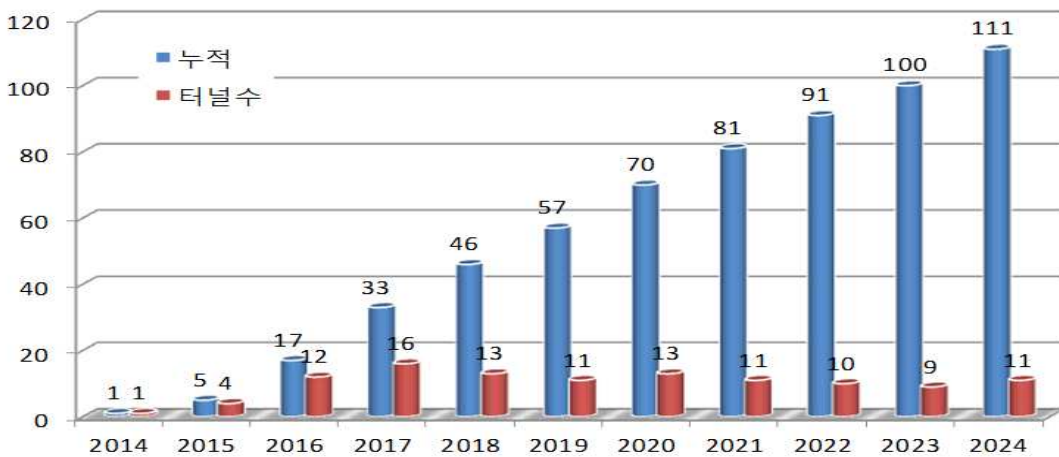


그림 3.1.23 예정 터널입구 후드 적용대상 터널개소

### 3. 미기압과 저감용 차세대 후드 경제성 평가

#### 가. 경제성 평가 기법 개요 및 특징

- 경제성 평가의 기본 개념은 한 가지 또는 다수의 대안에 대해서 비용(투입자원) 대비 수익(결과/산출)을 비교하여 대안의 선택 여부 또는 대안간의 우선순위를 결정하는 것으로 평가 목적에 따라 다양한 방법이 사용됨. 수익을 표시하는 단위에 따라 (1)비용편익 분석, (2)비용효과 분석의 2가지 평가 방법으로 나눌 수 있으며 아래에 각 방법의 특징을 비교/요약 함.

#### (1) 비용편익분석(Cost-Benefit Analysis)

- 경제성 평가 시 가장 일반적으로 사용되는 방법으로 비용과 편익을 화폐단위로 표시하며, 미래에 발생하는 비용과 편익을 현재 가치로 전환하여 평가를 하기 때문에 적절한 할인율을 적용하여야 함. 비용편익분석의 기본 절차는 다음과 같다.

- 목표 및 가능한 대안들을 선정함.
- 대안들에 대한 비용과 편익을 화폐단위로 측정함.
- 대안별 비용과 편익에 대해 적절한 방법을 이용하여 대안을 평가 함.
- 대안을 비교하여 최적대안을 선정함.

- 경제적 타당성을 평가하기 위해서 편익과 비용을 비교하는 방법에 따라 다음의 3가지로 구분 됨: 순현재가치(Net Present Value: NPV), 내부수익률(Internal Rate of Return: IRR), 그리고 편익/비용 비율(Benefit Cost Ratio: B/C)이 있음.

#### (가) 순현재가치(Net Present Value: NPV)

- 순현재가치란 사업에 수반된 모든 비용과 편익을 기준연도의 현재가치로 할인하여 총편익에서 총비용을 제한 값이며 순현재가치 > 0이면 경제성이 있음은 의미로 해석함. 대안 i에 대한 순 현재 가치는 다음의 식으로 나타냄.

$$PV = (B_0 - C_0) + \frac{B_1 - C_1}{(1+r)^1} + \frac{B_2 - C_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{B_n - C_n}{(1+r)^n}$$

,  $NPV_i$  : 대안 i 실행 시 발생하는 순편익의 현재가치

$B_j$  : j 시점에서 발생하는 편익, j=1, 2, ..., n

$C_j$  : j 발생하는 비용,  $j=1, 2, \dots, n$   
 $r$  : 할인율  
 $n$  : 대안의 분석 기간

- 대안 선정의 평가기준 :  $NPV_i > 0$  ; 대안 선정 (이익이 발생함을 의미)  
 $< 0$  ; 대안 포기 (손해가 발생함을 의미)

(나) 내부수익률(Internal Rate of Return: IRR)

- 내부수익률은 편익과 비용의 현재가치로 환산된 값이 같아지는 할인율  $r$ 을 구하는 방법으로 현재가치 계산을 위한 객관적인 할인율의 적용이 어려울 경우에 유용하게 사용됨. 즉, IRR은 현재가치가 0이 되도록 하는 할인율임. 내부수익률이 사용하고자 하는 할인율보다 크면 경제성이 있음이고 판단함. 대안  $i$ 에 대한 순 현재 가치는 다음의 식으로 나타냄.

$$IRR_i \quad B_0 - C_0 + \frac{B_1 - C_1}{(1+r)^1} + \frac{B_2 - C_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{B_n - C_n}{(1+r)^n} = 0$$

- 대안 선정의 평가기준 :  $\rho$ (내부 수익율)  $>$   $r$ (시장 수익율) ; 대안 선정  
 $<$  ; 대안 포기

(다) 편익/비용 비율(Benefit Cost Ratio: B/C)

- 편익/비용 비율이란 총편익과 총비용의 할인된 금액의 비율, 즉 장래에 발생될 비용과 편익을 현재가치로 환산하여 편익의 현재가치를 비용의 현재가치로 나눈 것임. 일반적으로 편익/비용 비율  $>$  1이면 경제성이 있음이고 판단함.

$$(B/C)_i = \frac{B_i}{C_i}$$

여기서,

$$B_i = B_0 + \frac{B_1}{(1+r)^1} + \frac{B_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{B_n}{(1+r)^n} \quad : \text{대안 } i \text{의 현재 편익}$$

$$C_i = C_0 + \frac{C_1}{(1+r)^1} + \frac{C_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{C_n}{(1+r)^n} \quad : \text{대안 } i \text{의 현재 비용}$$

- 선정의 평가기준 :  $(B/C)_i > 1$  ; 대안 선정  
 $< 1$  ; 대안 포기

○ 상기 전술된 경제성 평가 기법의 특징을 요약하면 다음과 같다.

표 3.1.14 비용편익 분석기법의 특징 비교

분석기법	판단기준	장 점	단 점
편익/비용비율 (B/C)	$B/C \geq 1$	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 이해가 용이</li> <li>· 사업규모 고려 가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 상호배타적 대안 선택의 오류 발생 가능</li> </ul>
순현재가치 (NPV)	$NPV \geq 0$	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 대안 선택 시 명확한 기준 제시</li> <li>· 장래발생편익의 현재가치 제시</li> <li>· 한계 순현재가치 고려</li> <li>· 타 분석에 이용 가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 이해의 어려움</li> <li>· 대안 우선순위 결정 시 오류발생 가능</li> </ul>
내부수익률 (IRR)	$IRR \geq r$	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 사업의 수익성 측정 가능</li> <li>· 타 대안과 비교가 용이</li> <li>· 평가 과정과 결과 이해가 용이</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 사업의 절대적 규모 고려하지 않음</li> <li>· 몇 개의 내부수익률이 동시에 도출될 가능성 내재</li> </ul>

- 비용편익 분석은 다양한 측정단위로 표현되어지는 비용과 편익을 화폐단위로 적절하게 변환해야 하는 문제, 미래의 각기 다른 시점에서 발생하는 비용과 편익을 적절히 예측하여야 하는 문제, 그리고 미래의 가치를 현재 가치로 표현하기 위해 적절한 할인율을 선정하여야 하는 문제 등으로, 의사 결정자의 주관에 따라 대안의 선택이 변화 할 수 있는 단점이 있음. 따라서 이러한 불확실성을 해결하기 위해, 비용, 편익, 그리고 할인율에 대한 민감도 분석을 통해 상황에 따라 효율적인 의사 결정을 하게 됨. 또한 대안이 복수인 경우 상기 3개의 기법이 우선 순위 선정에 있어서 다른 결과를 도출 할 수 있기 때문에, 의사 결정시 사업의 특성에 맞도록 대안을 선정하는 것이 필요함. 가능한 대안들에 대한 최적의 의사 결정을 하기 위해서는 동일한 비용이 소요 되는 경우에는 편익이 가장 큰 대안을 선택하고, 이와는 반대로 편익이 같은 경우에는 비용이 가장 적게 드는 대안을 선택하게 됨.
- 일반적으로 경제성 평가를 위해서는 비용편익분석을 기본적인 방법으로 사용하여 분석하게 되지만, 국가 R&D사업, 신규 사업, 사회 정책적 사업 또는 결과가 질적인 개념으로 산출되는 경우와 같이 화폐단위를 이용한 가치 측정이 어렵거나 불가능하여 비용편익분석이 적합하지 않을 시에는 비용효과분석 기법을 이용하여 대안들 간의 편익 측정의 문제를 해결할 수가 있음.

(2) 비용효과 분석(Cost- Effect Analysis)

- 효과적인 대안 도출을 위해 각 대안들에 대한 비용과 결과(효과)를 비교하여 최적의 대안을 선정하는 방법으로, 투입 비용은 금전적 가치(화폐단위)로 측정하나, 결과는 산출물 단위를 직접 사용하게 됨. 즉, 결과의 측정이 화폐가치로 전환하기 어렵거나 동일한 결과가 산출되는 경우, 효율적인 대안 평가에 유용하게 사용됨. 비용효과분석은 크게 고정효과접근법(Fixed effectiveness approach) 고정예산접근법(Fixed budget approach)으로 나눌 수 있으며, 기본적인 차이점은 다음과 같다.

(가) 고정효과접근법: 결과(효과/목표)가 정해져 있는 경우, 이 결과를 달성하는데 가장 적은 비용이 소요되는 대안을 선택하는 방법으로 특히, 비교 대안들의 투입 비용과 효과를 평가하여 동일한 효과(목표)를 산출하는데 비용이 최소화되는 대안을 선정할 때 효과적으로 사용되는 방법임.

(나) 고정예산접근법: 비용(자원)이 정해진 경우, 주어진 비용 하에서 결과(효과/목표)가 최대가 되는 대안을 선정하는 방법임.

- 아래 표에 전술한 경제성 평가 기법의 특징을 비교 함.

표 3.1.15 경제성 평가 분석 기법별 특징 비교

분석 기법	투입단위	결과/산출 단위	비교(측정기준)
비용편익 분석	화폐	화폐	. 3가지 기법 사용. . 측정 단위가 동일
비용효과 분석	화폐	공통의 단일목표 (결과의 비 금액(화폐)화)	. 측정단위가 다름

나. 차세대 미기압과 저감 후드 경제성 평가

- 우리나라는 고속철도에서 터널 건설시 세계 최대 터널단면적을 유지함, 세계 최소 터널단면적(운행속도 200km/h급과 250km/h급, 단선터널단면적 40m<sup>2</sup>)을 적용하기 시작함으로써, 건설비용을 절감하게 되었으나, 터널 단면적의 축소로 고속 철도의 터널 통과 시 심각한 미기압과 발생으로 주변 환경에 영향을 미치는 환경 문제에 직면하게 됨.
- 일본, 프랑스, 독일 등 철도 선진국에서는 신규 터널 건설시 철도터널 단면적을 축소하고, 콘크리트 슬라브 궤도를 적용하기 때문에 미기압과 환경영향 검토를 수행하여 비용이 저렴하고 효과적인 미기압과 저감 후드를 설치하고 있음.(일본, 독일, 중국 등 고속열차 운영국 들은 '08년 이후부터 미기압과 허용기준을 마련하고 건설단계부터 저감시설을 설계에 반영) 아래 표는 해외 주요 고속 철도 운영국가들의 터널 특징 및 미기압과 저감대책의 적용 현황에 대해 요약한 것임.

표 3.1.16 주요 고속 철도 선진국들의 터널 사양 및 미기압과 저감 대책 적용현황

구분	일본			독일	한국
노선	조에츠신칸센	도호쿠신칸센신선 나가노신칸센	큐슈신칸센	Karlsruhe- Basel 신선	중앙선(도당-영천) 원주-강릉신선
최고 속도	245km/h	260km/h	260km/h	250km/h	250km/h
표준 터널 내공 단면적	63.5m <sup>2</sup>	63.4m <sup>2</sup> , 65m <sup>2</sup> , 66m <sup>2</sup>	63.5m <sup>2</sup>	62m <sup>2</sup> (단선터널)	40m <sup>2</sup> (단선) 66m <sup>2</sup> (복선)
케도구조방식	콘크리트케도 (발라스트케도)	콘크리트케도 (발라스트케도)	콘크리트케 도	콘크리트케도	콘크리트케도
미기압과저감 대책 적용현황	적용함	적용함	적용함	적용함	미정
적용기준	일본신칸센의 산악터널 설계 시공 표준				미정
적용방법	터널 연장 100m 이상의 터널을 대상으로 미기압과 허용기준 만 족여부에 따라 설치함				미정

- 일본은 도호쿠 신칸 센의 터널 미기압과의 폭발음 발생 등으로 이미 미기압과 저감 기  
술을 개발하여 적용하고 있으나, 우리나라는 중앙선 등의 250km/h급 단선터널에서 중  
요 설계사양이 일본의 경우에 비해 부족하기 때문에 미기압과 폭발음이 국제 기준치 이  
상으로 매우 크게 발생될 것이 확실시 되고 있음. 아래 표는 미기압과가 발생한 일본의  
터널보다 단면적이 훨씬 작은 우리나라 노선의 상황을 비교한 것임.

표 3.1.17 일본과 한국 터널의 미기압과 발생 현황 비교

국가	진입속도	노선명	터널단면적	터널명	터널길이	폭발음
일본	220km/h	도호쿠 신칸센	63.4m <sup>2</sup>	제 2 오오츠키	260m	크게 발생됨
일본	220km/h	도호쿠 신칸센	63.4m <sup>2</sup>	후쿠시마	11.7km	매우 크게 발생됨
한국	250km/h	중앙선 등	63.4m <sup>2</sup>	전체 터널	전체연장	매우 크게 발생 확실

- 따라서, 향후 건설 되거나 개량될 기존 터널의 사양이 상기 표의 경우와 비슷한 것으로  
보아, 고성능의 터널 미기압과 저감기술이 절실히 필요한 실정임.
- 본 보고서에서는 차세대 미기압과 저감 후드의 경제성 평가를 통해 후드 설치시의 비용  
절감을 통한 직접편익을 분석하도록 함. 터널 미기압과 저감 후드 설치는 시공비가 저  
렴하여, 향후 건설될 터널에 사용 될 운행속도 200km/h 이상의 고속철도에서 궁극적으  
로 최적설계의 최소 터널 단면적에서 적용되기 때문에 최선의 터널 건설비 절감방안이  
될 수 있음. 대안들의 경제성 평가를 위해 다음의 가정 사항을 이용함.

<가정 사항>

○ 터널 건설 비용 및 기준 단면적

- 터널 건설비용은 경부 고속 철도 건설 비용인 km당 250억 원을 기준으로 함.
- 터널 단면적을 20% 저감시키면 건설비가 10-15% 절감되기 때문에, 본 연구에서는 보수적으로 10% 절감되는 것으로 가정함.
- 기준 단면적은 경부고속 철도의 터널 단면적(107m<sup>2</sup>)을 적용함.

○ 후드설치 개수 및 비용

- 후드 설치 개수는 터널 당 입구와 출구에 각 1개소씩 설치하고, 후드 설치 비용은 개소 당 7억 원으로 가정함.

<경제성 평가>

○ 분석 평가 기법

- 비용효과 분석 사용

- 국내에서 미기압과 저감후드가 사용되어 실행중인 사례는 아직 없기 때문에, 구체적인 비용 및 편익에 대한 자료의 확보가 현실적으로 어려운 상황임. 따라서, 본 보고서에서는 편익(목표)을 소음 허용기준으로 정하고(일본의 50db/ 독일의 20db), 목표를 달성하기 위해 비용이 최소화 되는 대안을 선정할 수 있는 비용효과 분석 기법을 사용함.

○ 경제성 분석을 통한 최적 대안 선정

- 대안 i 총비용=(km 당 건설비용 x 터널 연장)+(후드 1개소 당 설치비용 x 2)
- 대안 i 의 경제성(절감액) = 기준 대안 총비용 - 대안 i 총비용

○ 경제성 분석 결과

(1) 단선 터널의 경우

- 기준 대안으로는 독일의 철도 터널의 단면적(62m<sup>2</sup>)을 사용하였고, 비교대안으로는 중국 고속 철도의 터널 단면적(48m<sup>2</sup>), 그리고 우리나라 중앙선의 터널 최소 단면적(40m<sup>2</sup>)을 비교함. 해외 국가들은 이미 미기압과 저감 후드를 적용하고 있기 때문에 기준 대안 대비 비교 대안들의 km당 터널건설 비용 절감액만을 산출함.

표 3.1.18 비교 대안단면적 별 건설비 절감액 비교

[비용단위 : 억 원 \* 단면적(107m<sup>2</sup>) 기준]

단면적 (대안)	단면적 축소비율(%)*	km당 터널 건설비용	국가/ 터널	속도	비고
62m <sup>2</sup>	42.06	197	독일/ Karlsruhe-Basel 신선	250km/h	미기압파 후드 적용
48m <sup>2</sup>	55.14	181	중국/수이유 고속 철도	200km/h	미기압파 후드 적용
40m <sup>2</sup>	62.62	171	한국/중앙선	250km/h	통풍관형 후드 적용 시 미기압파 저감 가능

○ 아래 그림에서 보듯이 우리나라 중앙선의 터널에 차세대 후드를 적용 시 해외 국가들의 경우처럼 미기압파 저감효과를 내면서(200km/h의 속도에서 허용기준 만족), 건설 비용은 62m<sup>2</sup>에 비해 km 당 약 26억 원의 절감 효과를 나타내었고, 48m<sup>2</sup> 단면적 터널보다는 약 10억 원의 비용 절감 효과를 나타냄. 또한 48m<sup>2</sup> 단면적의 터널은 62m<sup>2</sup> 단면적에 비해 km당 16억 원의 건설 비용이 절감되는 것으로 나타남.



그림 3.1.24 단선 터널 단면적별 Km당 절감액 비교

○ 아래 표에 보듯이, 독일의 터널 단면적에 대한 km당 건설비용 대비 단면적 48m<sup>2</sup>는 약 92%의 비용으로 터널 건설이 가능하며, 최소 단면적(40m<sup>2</sup>)인 경우에는 약 87%의 비용으로 터널 건설이 가능하며, 13%의 건설 비용 절감효과를 얻게 됨.

표 3.1.19 독일 철도 터널단면적 대비 대안 단면적별 총 비용 및 절감액 비교

단면적 (대안)	1km당 터널 건설비용 비율(%)	1km당 터널 건설 비용 절감비율(%)	허용기준(50 Pa)
62m <sup>2</sup>	-	-	. 허용 기준 만족
48m <sup>2</sup>	91.7	8.3	. 허용 기준 만족
40m <sup>2</sup>	86.984	13.1	. 200km/h의 속도로 진입 시 허용 기준만족 . 200km/h 이상 진입속도에 의한 허용 기준 초과 시 후드 길이 또는 성능향상 등으로 허용 기준 만족가능

○ 아래 그림에 단면적별 km당 건설 비용과 절감 비용에 대한 비율을 나타냄.

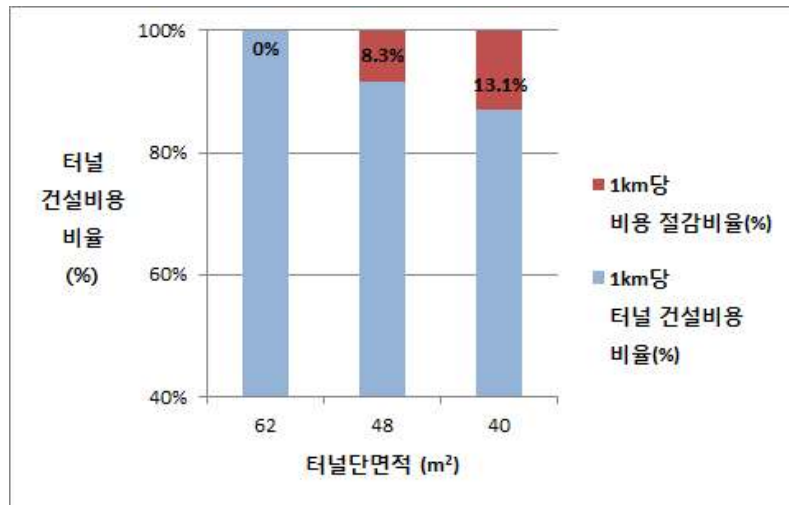


그림 3.1.25 단선 터널건설 km당 총 비용 및 절감액 비교

○ 아래 표에 40m<sup>2</sup> 최소 단면적 적용 시 절감되는 비용의 가치에 대해서 요약 함. 독일 고속 철도의 단면적 62m<sup>2</sup> 대비 40m<sup>2</sup>의 단면적으로 시공할 경우, 1km 터널 건설시 절감비용으로 1.86 개의 터널에 차세대 후드(1터널 당 2개소)를 설치할 수 있으며, 추가건설이 가능한 터널 길이는 150m로 나타나 후드의 비용절감 효과가 큰 것을 알 수 있음. 또한 단면적 48m<sup>2</sup>와 비교 시 1km 터널시 건설비용으로 0.67개의 터널에 차세대 후드를 설치할 수 있으며, 추가건설이 가능한 터널 길이는 55m로 나타나 후드의 비용절감 효과가 큰 것을 알 수 있음.

표 3.1.20 터널 최소 단면적(40m<sup>2</sup>) 적용 시 km 당 절감액의 가치 비교

대비 단면적	후드 설치 가능 터널 수	터널 추가 건설 길이	비고
62m <sup>2</sup>	1.86	0.1502km	
48m <sup>2</sup>	0.67	0.0546km	

(2) 복선 터널의 경우

○ 기준 대안으로는 250km 급 고속 철도용 터널로 건설이 가능한 85m<sup>2</sup> 단면적을 사용하였고, 비교 대안으로는 우리나라 중앙선 터널 최소 단면적(66m<sup>2</sup>)과 3개의 대안 단면적(80m<sup>2</sup>, 75m<sup>2</sup>, 70m<sup>2</sup>)을 선정하여 각 대안들의 터널건설 비용 절감액(경제성)을 산출 함. 모든 대안들에 대해서 후드 적용을 가정하였고, 교차 비교를 위해 (가) km당 절감액과 (나) 경부고속철도 터널 연장 기준 총 절감액 비교를 통한 절감액 효과를 분석함.

(가) km당 절감액 비교

○ 터널의 단면적들에 대한 km 당 비용 절감액을 비교 한 결과, 중앙선의 터널에 차세대 후드를 적용 시 건설 비용은 70m<sup>2</sup>에 비해 km 당 4억 원의 절감 효과를 나타내었고, 75m<sup>2</sup> 단면적 터널보다는 10억 원의 비용 절감 효과를 나타냄. 또한 80m<sup>2</sup> 단면적에 비해 16억 원의 절감 효과가 있었고, 85m<sup>2</sup> 단면적에 비해 km당 22억 원의 건설 비용이 절감되는 것으로 나타남 (표 3.1.21참조).



그림 3.1.26 복선 터널 단면적별 km 당 절감액 비교

(나) 경부고속철도 터널 연장 기준 총 절감액 비교

○ 경부 고속철도 터널 연장 기준으로 85m<sup>2</sup> 단면적 대비 80m<sup>2</sup>, 75m<sup>2</sup>, 70m<sup>2</sup> 단면적을 적용할 경우 총 절감액은 각각 1,139억 원, 2,278억 원, 3,417억 원의 비용 절감 효과가 있으며, 최소 단면적인 66m<sup>2</sup>인 경우, km당 터널 건설비용은 22억 원이 절감되며, 총 4,328 억 원의 비용이 절감되는 것을 알 수 있음.

표 3.1.21 터널 단면적 별 건설비 절감액 비교

[비용단위: 억 원 \*경부고속철도 터널 연장 195km 적용]

단면적 (대안)	단면적 축소비율(%)	km당 터널 건설비용	총 터널 건설비용*	총 비용 절감액	국가/터널
85m <sup>2</sup>	20.56	224	43,738	-	-
80m <sup>2</sup>	25.23	218	42,599	1,139	-
75m <sup>2</sup>	29.91	212	41,460	2,278	-
70m <sup>2</sup>	34.58	206	40,321	3,417	-
66m <sup>2</sup>	38.318	202	39,410	4,328	한국/중앙선 터널

○ 또한, 중앙선의 터널에 차세대 후드를 적용 시 터널 총 건설 비용은 70m<sup>2</sup>에 비해 총 911억 원의 절감 효과를 나타내었고, 75m<sup>2</sup> 단면적 터널보다는 2,050억 원의 비용 절감 효과를 나타냄. 또한 80m<sup>2</sup> 단면적의 터널보다는 3,189억 원의 절감 효과를 나타내었고, 85m<sup>2</sup> 단면적보다는 총 4,328억 원의 건설 비용이 절감 되는 것으로 나타남.



그림 3.1.27 복선 터널 단면적별 총 절감액 비교

○ 다양한 터널 단면적을 이용한 단선 터널과 복선 터널의 건설 비용 검토 결과, 최소 단면적의 터널에 후드를 적용함으로써, 미기압파를 효과적으로 저감하는 경제성 있는 대책으로 분석 됨.

(다) 중앙선 도담-영천 기타설계공구의 후드 적용에 의한 경제성 분석

○ 중앙선 도담-영천 기타설계공구의 실시설계 기술심의를 한국철도시설공단 공문 일반철도처-1959 (2015.04.07.)과 일반철도처-2159 (2015.04.20.)으로 완료함. 이 때 상정안건에 “터널 미기압 저감시설 적용 적정성 심의” 내용에서 미기압과 저감 방법별 공사비 비교가 있으며 10개소 설치에 대한 비교에서 후드 설치시는 42억원(특허료 개소당 0.5억원 포함), 터널 단면 확폭 시에는 685억원, 터널에 통풍공 설치 시에는 402억원으로 후드 설치시에 공사비 절감액이

최소 360억원의 효과가 있음이 비교되어 있음.

### 1.7 방법별 공사비 비교

#### 1.7.1 미기압 저감 방법별 공사비

구 분	굴 착 비			특허사용료 (억원)	총 계 (억원)
	개소당 단가 (억원/개소)	설치개소	소 계 (억원)		
· 갱구부 후드 설치	3.7	10	37.0	5	42.0
· 단면 확폭	68.5		685	-	685.0
· 통풍공 설치	40.2		402	-	402.0

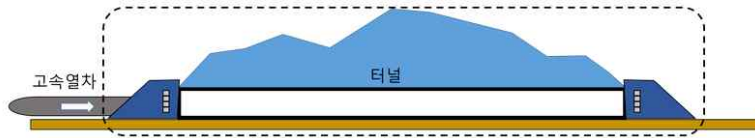
※ 제압비는 일률적으로 45% 적용함

※ 갱구부 후드 설치 특허사용료는 개소당 0.5억원 적용

#### 1.7.2 검토결과

- 미기압 저감 방법별 공사비 검토 결과, 갱구 후드설치 적용시 가장 경제적인 것으로 나타나, 갱구부 후드를 최종 선정함

(a) 갱구부 후드설치: 42억원



(b) 터널단면 확폭: 685억원



(c) 통풍공 설치: 402억원

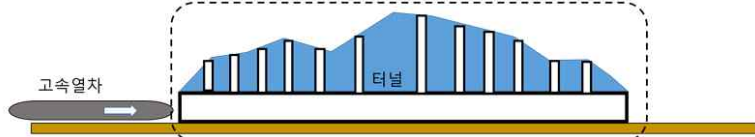


그림 3.1.28 터널 미기압과 저감방법별 공사비 비교

#### 4. 결론 및 향후 방향

- 일본, 독일, 중국 등 고속열차 운영국가 들은 2008년 이후부터 미기압과 허용기준을 마련하고 건설단계부터 저감시설을 설계에 반영하도록 하고 있으나, 우리나라는 아직 구체적인 철도관련 소음 기준은 마련되어 있지 않은 상황임. 향후 철도의 고속화에 따른 기존 터널 및 신규 터널 건설시 미기압과에 의한 소음 및 관련 문제점을 저감하기 위한 대책이 필요한 실정임. 철도 터널 미기압과를 저감하기 위한 대책은 여러 가지 방법이 있으나, 미기압과 저감 후드를 설치하는 것이 가장 효율적인 방법으로 알려져 있으며, 유럽, 일본, 대만 등에서도 미기압과 저감 후드를 사용한 대책을 사용하고 있음.
- 따라서, 본 보고서에서는 터널내부로의 고속열차 진입에 의하여 생성된 압축파가 터널의 출구에서 충격성 소음으로 변환되어 주변 민가 등에 환경적 영향을 미치는 미기압과의 저감 대책인 차세대 후드의 경제성 분석을 시행함.
- 분석 결과는 다음과 같다.

##### 가. 차세대 후드 기술의 수준

- (1) 차세대 후드를 기준으로 각 기술간 최대 저감 성능 비교 시 통풍관형 후드는 차세대 후드의 약 83%, 그리고 일본의 창문형 후드는 차세대 후드 대비 약 70%의 기술 수준을 나타내고 있음.
- (2) 따라서, 차세대 후드는 경쟁기술인 일본의 창문형 후드에 비해 기술수준 및 경쟁력에서 앞서 있는 것으로 나타남.

##### 나. 차세대 후드 기술의 미기압과 저감 효과

- (1) 향후 건설될 200km/h 이상의 고속 열차 운행용 터널 단면적(40m<sup>2</sup>)에 대한 실험 결과 터널 연장에 상관없이 모든 터널(1km 이하, 3km, 7km 이상)에서 미기압과의 허용기준을 초과하는 것으로 나타남.
- (2) 미기압과의 영향을 받지 않기 위해서는 175km/h-216km/h 로 속도를 감속해야 하는 상황이 발생하게 되어, 열차의 정시 운행의 불확실성 등 고객 서비스의 문제가 발생할 가능성이 높다.
- (3) 반면 후드를 설치하였을 경우 최소 200km/h의 속도로 진입이 가능하며, 특히 1km미만의 터널에서는 250km/h의 속도로 감속하지 않고 진입하여도 미기압과의 허용기준을 만족하게 됨.
- (4) 터널 연장이 3km 이상의 중·장대 터널일 경우, 터널의 특징에 따라, 후드의 길이 연장 또는 개수 증가 등의 추가적인 저감대책을 활용하여 허용기준을 만족 시킬 수 있을 것으로 예상됨.

다. 차세대 후드 적용시의 건설비용 절감을 통한 경제적 이익의 효과

(1) 단선 터널의 경제성 분석

- 독일의 철도 터널의 단면적(62m<sup>2</sup>), 중국 고속 철도의 터널 단면적(48m<sup>2</sup>), 그리고 우리나라 중앙선의 터널 최소 단면적(40m<sup>2</sup>)을 비교한 결과,
- 우리나라 중앙선의 터널에 차세대 후드를 적용 시 해외 국가들의 경우처럼 미기압과 저감효과를 내면서, 건설 비용은 62m<sup>2</sup>에 비해 km 당 약 26억 원의 절감 효과를 나타내었고, 48m<sup>2</sup> 단면적 터널보다는 약 10억 원의 비용 절감 효과를 나타냄.
- 독일의 터널 단면적에 대한 km당 건설비용 대비 단면적 48m<sup>2</sup>는 약 92%의 비용으로 터널 건설이 가능하며, 최소 단면적(40m<sup>2</sup>)인 경우에는 약 87%의 비용으로 터널 건설이 가능하며, 독일 터널 단면적 대비 약 13%의 건설 비용 절감효과를 얻게 됨.

(2) 복선 터널의 경제성 분석

(가) km당 절감 효과

- 터널의 단면적들에 대한 km 당 비용 절감액을 비교 한 결과, 중앙선의 터널에 차세대 후드를 적용 시 건설 비용은 70m<sup>2</sup>에 비해 km 당 4억 원의 절감 효과를 나타내었고, 75m<sup>2</sup> 단면적 터널보다는 10억 원의 비용 절감 효과를 나타냄. 또한 80m<sup>2</sup> 단면적에 비해 16억 원의 절감 효과가 있었고, 85m<sup>2</sup> 단면적에 비해 km당 22억 원의 건설 비용이 절감되는 것으로 나타남.

(나) 경부 고속 철도 터널 연장을 기준으로 한 총 절감 효과

- 중앙선의 터널에 차세대 후드를 적용 시 터널 총 건설 비용은 70m<sup>2</sup>에 비해 총 911억 원의 절감 효과를 나타내었고, 75m<sup>2</sup> 단면적 터널보다는 2,050억 원의 비용 절감 효과를 나타냄. 또한 80m<sup>2</sup> 단면적의 터널보다는 3,189억 원의 절감 효과를 나타내었고, 85m<sup>2</sup> 단면적보다는 총 4,328억 원의 건설 비용이 절감되는 것으로 나타남.
- 세계적으로 터널 건설시 건설비 절감 방안으로 터널 최소단면적을 적용하고 있으며, 이로 인해 미기압과에 의한 환경적인 영향은 계속 될 것으로 예상됨. 따라서, 후드의 적용에 의한 보다 효율적이고 경제적인 미기압과 저감 대책이 필요할 것임. 향후 보다 구체적인 후드의 효과 분석을 위해서는 최소 터널 단면적과의 비교를 통한 기본적인 비용절감 차원에서의 경제성 평가뿐만 아니라 다양한 요인들을 고려한 다차원적인 분석이 필요할 것임. 이를 위하여,

① 미기압과에 영향을 미치는 공학적인 변수들을 고려한 후드의 저감 효과 산정

- 터널 내 열차진입속도의 변화, 터널 단면적의 변화, 열차 성능/종별/전두부 형상, 터널 연장의 변화를 고려한 차세대 후드의 저감 효과에 대한 구체적인 데이터의 확보가 필요함.

- ② 미기압과 저감 기준을 만족시키는 (후드를 미적용한) 최적 터널 단면적 산정
  - 후드가 필요하지 않은 최적의 터널 단면적을 산정함으로써, 이 단면적보다 축소된 터널 단면적에 후드를 적용 하였을 시의 비용 절감액을 계산하여 후드의 효율성 및 가치를 평가하여야 할 것임.
- ③ 해외 사례를 분석하여 다차원적인 경제성 분석을 위한 신규 요인 도출
  - 해외의 미기압과 저감 대책 및 저감 기준을 분석하여 주요 미기압과 영향 관련 요인을 도출하고 이를 이용하여 향후 한국형 미기압과 저감 기준 제정을 위한 연구가 필요 할 것임.

## 2절 정책적 타당성

- 녹색교통 추진전략에 따라 국내 철도망에 대한 대폭적인 확대 추진
  - 철도연장을 현재 3,557km에서 2020년까지 4,934km로 확충하고, 현재 49.6%인 철도 복선화율을 79.1%로, 60.4%인 전철화율을 85.0% 제고
  - 건설·운영 중인 철도노선의 고속화를 통해 철도 최고속도를 기존의 150km/h 수준에서 230km/h로 향상
  - 도시·광역철도망을 2012년까지 기존 831km에서 1.3배 수준인 1,054km로 확대 하며, 운행방식도 점차 거점역 정차 또는 교차정차 중심의 급행위주로 개선
- 녹색교통 추진을 위하여 전체 교통 분야 SOC 투자 중 철도비율을 현재 29%에서 2020년 50%까지 확대하는 한편, 사업비 절감을 위한 새로운 설계기준 마련 추진 필요
  - 2020년까지 철도망 확충에 88조원의 투자가 필요하며, 부문별로는 고속철도 16조원, 일반철도 46조원, 광역철도 26조원이 소요 전망
  - 88조원의 소요재원 확보는 국비 59조원, 지방비 3조원, 민자 유치·공기업·기타 26조원 등으로 조달 예정
  - 교통부문 SOC 투자의 철도 분야 확대와 함께 투자재원의 효율적 집행을 위하여 철도구축 사업비 절감을 위한 새로운 설계기준 마련 추진 필요
- ‘제3차 중기교통시설 투자계획’ 이 목표로 하는 저탄소 녹색성장을 견인 및 교통SOC의 적기확충을 통해 물류비용 등 사회경제적 비용 감축이라는 목표 달성을 위하여 본 사업의 추진 필요
- ‘제2차 국가철도망 구축계획’ 은 2020년에 KTX 고속철도망을 통해 전국 주요도시를 1시간 30분대로 연결하는 것을 목표로 하고 있으며, 본 사업을 통해 이의 조기 실현 및 소요예산 절감이 가능
  - ‘국가철도망 구축계획’ 은 국토해양부의 철도분야 10년 단위 중장기 투자계획으로 저탄소 녹색성장, 5+2 광역경제권 발전전략 등에 대응하고, 미래 녹색국토 구현

을 위한 KTX 고속철도망 구축전략 의 실천계획으로서 ‘제2차 국가철도망 구축계획’ 을 수립

- 철도연장을 3,557km에서 4,934km로 확충되고, 복선화율은 49.6%에서 79.1%, 전철화율은 60.4%에서 85.0%로 제고

표 3.2.1 철도사업 표준 공사비

(기준단가 '09. 5월, 억원/km)

구분	단위	일반철도 200km/h	고속화철도 230km/h	고속철도		비고		
				단선 350km/h	복선 350km/h			
1. 시설비	km	284	298	256	365			
노 반	토공	일반구간	km	99	99	89	108	
		연약구간	km	128	128	133	162	
	교량	과선교	km	34	34	73	104	
		일반구간	km	303	303	239	356	
		연약구간	km	374	374	257	425	
	터널	산악터널	km	195	195	168	240	
		도심터널	km	548	548	-	-	개착 BOX
	정거 장	토공부	개소	141	141	132	203	
		교량부	개소	687	687	1,218	2,030	2홈 4선
	궤도	km	21	21	26	37		
건물	km	19	19	8	12			
전력	km	7	7	4	5			
신호	km	18	18	13	19			
통신	km	10	10	10	14			
전차선	km	21	21	15	21			
2. 부대비	%	24	24	21	30	시설비 8.1%		
3. 용지보상비	km	38	38	27	39			

\* 일반철도 표준공사비는 “철도투자평가 비용부문의 합리화방안 연구” (08.10, 철도공단)의 공사비 적용

\* 일반철도 교량부 정거장 폭 34.9m, 연장 1,050m, 고속철도 정거장 폭 41m, 연장 2,000m 적용

\* 고속철도는 “호남고속철도 실시설계”(건축시스템 기본설계 반영) 결과 반영(06.11~09.07)

○ 철도인프라의 각 분야가 건설비에서 차지하는 비중을 알아보기 위하여 “철도사업표준공

사비를 조사하였음. 일반철도와 고속화철도, 고속철도로 구분하여 km당 단가를 표시하고 있음

- 표 3.2.1에서 정거장은 km당 단가가 아니며, 개소 당 단가이므로 다른 분야와 직접적으로 비교할 수는 없어서, 호남고속철도의 평균 역간거리가 약 50km이므로 이를 반영하면 고속철도 복선 교량구간의 정거장인 경우 km당 40.6억원으로 궤도와 비슷함. 고속철도 정거장의 경우 건설비가 일반철도에 비하여 2배정도 되고 있음

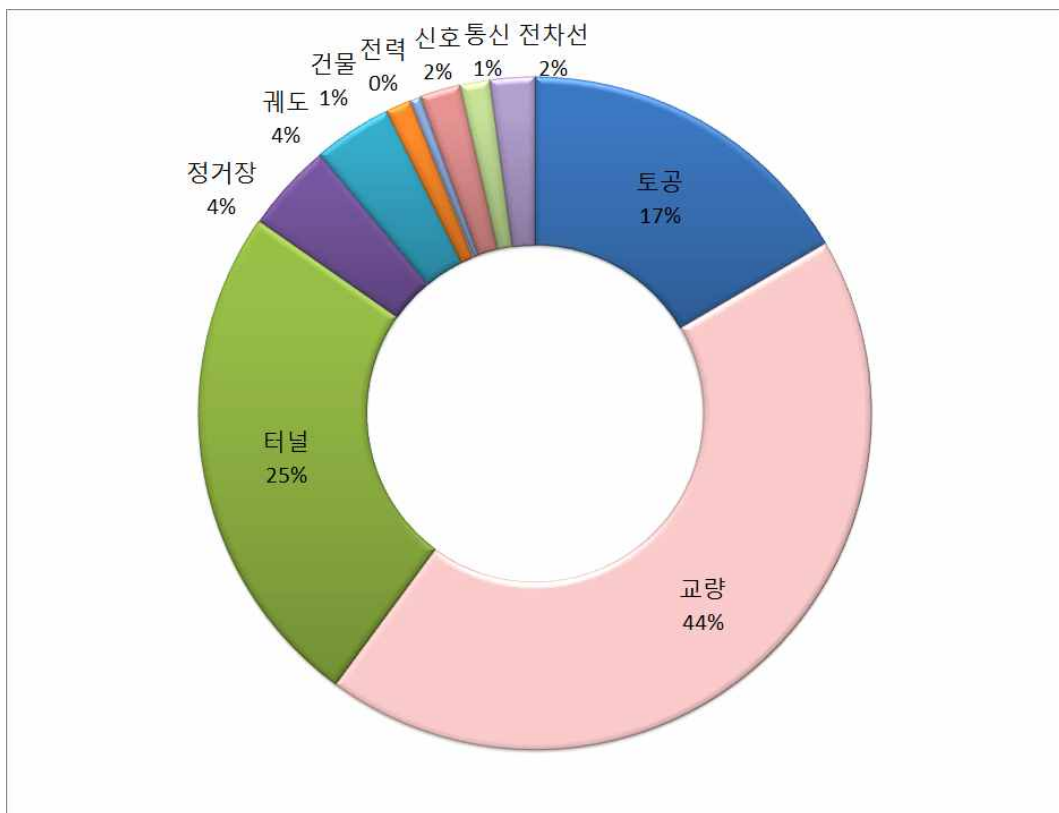


그림 3.2.1 철도인프라 분야별 건설비 비율 (호남고속철도)

- 표 3.2.1과 그림 3.2.1은 철도사업 표준 공사비에서 복선 고속철도의 연약지반에서의 분야별 공사비를 비교한 것임. 교량이 전체의 43.6%를 차지하고 있으며 다음으로 터널, 토공 순이며 정거장, 궤도 등이 3%이상을 비율을 나타내고 있음
- 이외의 건축(건물), 전력, 전차선, 신호, 통신 등은 1% 수준의 비율을 차지하고 있음
- 호남고속철도의 경우에는 평야지대를 운행하기 때문에 전체 노선에서 터널이 차지하는 부분이 약 20% 정도이지만,
- 현재 시공 중이거나 설계중인 원강선, 중앙선, 동해선, 중부내륙철도, 서해선 등은 전체 노선에서 터널이 차지하는 비중이 평균 50%가 넘기 때문에 건설비 절감의 효과는 터널, 교량, 토공, 정거장 등의 순서로 효과가 있을 것으로 판단됨

- 현재 국내의 터널은 거의 100% 국내의 기술로 설계 및 시공되고 있지만 국내에서 독창적으로 개발한 기술보다는 외국의 기술과 장비를 들여와서 사용하고 있으며, 이는 국내 실정에 적합한 터널기술로의 발전을 더디게 하며 아직도 시공분야를 제외하고는 선진외국의 터널기술과 상당한 격차가 있음
  - 고속열차 차량의 경우는 국토부의 차량안전기준에 관한 규칙에 따라 200km/h급 이상의 고속열차에 대하여 차체 기밀도 18이상으로 제작되기 때문에 터널 건설비 저감을 위하여 터널 최소단면적에서의 운행에 크게 문제가 되지 않지만, 터널 미기압과 문제에 대해서는 터널 단면적 최소화 설계에 자유롭지 않음.
  - 철도터널의 경우에 최적화된 최소단면적에서 열차가 고속으로 운행하기 위해서는 터널 미기압과 저감 대책 기술개발이 필요하며, 앞 절의 경제성 분석 결과에서와 같이 건설비 저감 기여율이 크다고 판단할 수 있음.
- ※ 참고문헌: 이 지하 외, 철도인프라 성능 및 건설비 최적화를 위한 기반기술 개발 기획보고서, 2012. 2.2, 한국철도기술연구원

### 3절 기술적 타당성 및 필요성

#### 1. 기술개발 필요성

- 현재 설계중이나 계획된 250km/h급 신규고속철도(중앙선, 원주-강릉선(건설중), 서해선, 동해선, 중부내륙철도 등)의 100개소이상 터널에서 미기압과 저감 대책기술이 필요하고, 현장 적용성에 대한 연구가 필요함. 향후 고속철도 수출 시 독자기술의 원천기술과 실용화 실적이 필요함.
- 2017년 완공의 원주-강릉선을 필두로 중앙선, 문경-충주선, 서해선, 동해선, 중부내륙철도 등이 계획 되어 있으나, 국내에서 200km/h급 이상의 콘크리트 궤도에서의 소단면 터널(복선:66m<sup>2</sup>, 단선:40m<sup>2</sup>) 건설이 처음이라, 터널 미기압과 환경영향평가 예측/검증 관련하여 현장시험 데이터를 확보할 철도현장이 없으며, 환경영향평가 해석기술의 신뢰도를 평가할 수 없음.
- 이에 일본 신칸센에서 17년 동안 축적된 터널 미기압과 현장시험 데이터에 근거한 데이터뱅크와 대책기술을 국내에 활용할 수 밖에 없으나, 일본 J-slab 콘크리트궤도, 신칸센 터널단면적(복선:64m<sup>2</sup>), 일본 고속열차의 운행특성에 맞추어진 데이터뱅크라 활용하는데 제한이 있으며, 국내 실정에 맞는 실용화 기술개발과 현장시험 데이터가 필요함.
  - 국내에 소단면 터널의 미기압과 현상에 대한 현장데이터가 전혀 없는 현실이며, 미기압과 저감 후드의 성능에 대해서는 국내 현장시험 데이터가 전무한 실정임.

- 현재 철도 선진국은 미기압과 저감 후드의 현장적용 효과에 대해서 정확한 현장 데이터를 확보하고 있으며, 국가별로 터널의 형식 및 내부구조, 열차의 형태 등이 상이하어 각 국가마다 미기압과의 발생형태가 다양하게 발생하여, 우리나라에서도 현실에 맞는 데이터 취득 및 미기압과 저감 후드의 성능평가가 정량적으로 이루어져야만 해외로의 기술이전 및 수출 등이 가능하며, 앞으로 열차의 고속화 및 해저철도 터널 등에 대응이 가능하며, 이러한 기술이 완성되기 전에는 터널 단면적의 증대 및 열차속도 제한 등 많은 고비용의 요소가 상존하고 있어 철도 인프라 확충에 많은 애로가 발생하게 될 것임.
- 실용화 본과제가 도출되면, 원주-강릉선 장대터널의 터널 미기압과 관련 제반 문제를 해결함과 동시에 터널 연장별 현장시험을 병행하여 원주-강릉선 이후에 건설되는 중앙선, 문경-충주선, 서해선, 동해선, 중부내륙철도의 터널 미기압과 문제에 대한 실효성 있는 대책을 마련함과 동시에 꼭 필요한 터널에만 미기압과 대책을 적용할 수 있는 설계 데이터 बैं크를 확보할 수 있으며, 터널 최적단면적 설계, 사갱과 기재갱의 활용성, 국내에 적용된 레다-2000(Rheda-2000) 콘크리트궤도와 궤도변 공동구의 공기역학적 특성, 국내운행 고속열차의 미기압과 기여특성을 파악할 수 있어 궁극적으로 터널건설비 건전화에 크게 기여할 수 있음.
- 또한, 세계 최고수준인 일본 신칸센 미기압과 저감 후드보다 미기압과 저감 성능이 22% 더 뛰어나고, 시공성과 적용성이 우수한 한국형 미기압과 저감 후드의 원천기술을 국내에서 개발하였으나, 실험실 수준에서 검증된 기술로서 철도현장 테스트-베드에서의 성능시험으로 공기역학적 튜닝시험으로 최적화 과정이 필요함.
  - 즉, 현장시공 및 현장시험을 통하여 원천기술의 현장 적용성 및 성능평가가 필요함.
  - 국가시설인 철도 인프라 시설물의 다양한 터널에 적용하기 전에 반드시 성능평가 및 검증절차가 필요함.
- 시급성: 250km/h급(200km/h급)으로 건설 또는 설계중인 신규철도에서 많은 개소의 후드가 필요한 실정임. 터널 미기압과 저감 후드는 현장검증으로 설치되어야 함. 현장검증 없이 설치하려면, 일본 신칸센 후드기술을 수입하여 적용하여야함. 2016년부터 원주-강릉선을 시작으로 총 100여개소의 후드 수요가 예상됨.
  - 원주-강릉선 터널단면적 66m<sup>2</sup>의 장대터널 6개소 터널: 후드 12개소
  - 도담-영천선 터널단면적 40m<sup>2</sup>의 장대터널 5개소 터널: 후드 10개소
  - 문경-충주선 터널단면적 40m<sup>2</sup>의 장대터널 3개소 터널: 후드 6개소 등

## 2. 기술적 타당성 전문가 평가

### 가. 기술적 타당성 평가 설문 항목

- 기술적 타당성 분석 결과에 대해 각 항목별로 전문가의 설문 조사를 위한 설문은 다음의 표와 같음

표 3.3.1 기술적 타당성 분석 평가 항목

평가 항목	평가 내용	평가 결과(5점 척도)				
		매우 그렇다	그렇다	보통	그렇지 않다	매우 그렇지 않다
기술개발 계획의 적절성	1. 사업목표가 구체적인가?	5	4	3	2	1
	2. 사업내용이 논리적이고 적절한가?	5	4	3	2	1
	3. 사업추진 전략이 구체적이고 도출근거가 제시되었는가?	5	4	3	2	1
	4. 사업추진 체계가 적절한가?	5	4	3	2	1
	5. 성과평가 및 관리체계가 적절한가?	5	4	3	2	1
	6. 연구개발 계획이 완전하게 수립되었는가?	5	4	3	2	1
기술수준 및 성공 가능성	7. 보유기술 수준이 적절히 평가되었고 기술개발 기대수준이 적절한가?	5	4	3	2	1
	8. 기술개발 역량 및 잠재력이 충분한가?	5	4	3	2	1
	9. 기술적 위험요인은 충분히 대비되어 있는가?	5	4	3	2	1
	10. 기술개발이 성공할 것으로 예상되는가?	5	4	3	2	1
기존사업과의 중복성	11. 기존사업과의 중복성이 적절히 검토되었고 중복 가능성은 없는가?	5	4	3	2	1

나. 기술적 타당성 평가 설문 결과

- 기술적 타당성 평가 설문 결과는 다음의 표와 같음
- 전문가의 기술적 타당성 평가 결과에 따르면 각 항목별로 모두 5점 척도중 평균 4점 이상으로서 기술적 타당성이 있는 것으로 분석됨

표 3.3.2 기술적 타당성 분석 전문가 평가 결과

문항	A위원	B위원	C위원	D위원	E위원	F위원	G위원	H위원	I위원	J위원	K위원	평균
문항1	5	5	5	5	5	5	5	4	4	5	5	4.82
문항2	5	5	4	5	5	4	5	4	4	5	5	4.64
문항3	5	5	5	5	5	5	5	4	4	5	5	4.82
문항4	4	5	4	5	5	5	4	4	4	5	5	4.55
문항5	4	4	4	4	5	4	4	4	4	5	5	4.27
문항6	4	5	4	5	5	5	5	4	3	5	4	4.45
문항7	5	5	4	5	5	5	5	5	4	5	4	4.73
문항8	5	5	5	5	5	5	5	5	3	5	4	4.73
문항9	4	4	4	4	5	4	4	3	3	5	5	4.09
문항10	5	5	4	5	5	5	5	5	4	5	5	4.82
문항11	4	5	5	4	4	5	5	4	3	5	3	4.27

## 4절 정부지원 타당성

### 1. 기술개발투자의 시의성, 시급성

- 현재 설계중인 100개소 이상의 터널이 콘크리트 궤도 및 최소내공 단면적으로 계획되어 있어 미기압파에 따른 민원급증 예상
- 철도건설이 완공된 후에 저감대책을 적용할 경우 열차운행 안전성, 지장물 이설, 매몰비용 추가, 산악지형 조건 등으로 공사비 약 5~6배 증가
- 국내에서 운행되는 경부고속철도와 호남고속철도에서는 대단면의 철도터널을 적용하여 그동안 터널 미기압파 문제에 관심을 가지지 않았지만, 현재 설계되고 있는 신규 고속철도는 전부 소단면 철도터널과 콘크리트궤도를 적용하기 때문에 터널 미기압파 문제에 대한 대책이 필요하게 되었음.
- 한국, 유럽, 중국, 일본 등에서는 앞으로 신선 건설에서 유지보수와 하중문제로 콘크리트 궤도가 적용될 것임.
- 터널 출구에서 방사되는 미기압파는 소닉 붐(sonic boom)으로 대부분이 저주파성분이기 때문에 선로변의 방음벽 시설로 저감시키거나 막을 수 없음. 최근 2005년 이후 유럽과 일본, 중국, 대만 등의 신규 고속철도들은 발라스트궤도에서 콘크리트궤도로 바뀌어 개통되고 있는데, 콘크리트궤도의 공기역학적 특성 때문에 전부 터널입구에 미기압파 저감 후드(hood)를 설치하고 있음.
- 운행속도 200km/h 이상의 고속철도에서 터널 미기압파 저감 후드 대책은 시공비가 저

렵하며, 궁극적으로 최적설계의 터널 단면적에서 적용되기 때문에 최선의 터널 건설비 절감 방법임.

- 최소 내공단면적과 콘크리트케도를 적용한 250km/h급 신규고속철도 터널이 100개소 이상이라 터널 미기압과 저감 대책이 시급하고, 고속철도 수출시 독자기술의 원천기술과 철도현장 적용실적(실용화)이 필요함.
- 현재 설계중인 도담-영천 중앙선, 동해선, 이천-충주 철도건설 등 국내 대부분의 철도 건설에서 터널의 최소 내공단면적과 콘크리트케도를 적용하게 되는데, 이러한 조합의 경우에 터널출구에서 미기압파라는 충격성 환경 소음진동이 크게 터져 나오는 문제점을 수반하고 있음.
- 2017년 원주-강릉 신선을 시작으로 2025년 이후까지 많은 수의 노선이 개통 예정으로 있으며, 200km/h이상의 고속열차 운행 시에 터널 미기압과 문제가 발생할 우려가 매우 높으므로 기술개발을 통한 저감 대책 확보가 매우 시급한 실정임. 본선 TEST-BED에서의 실용화 기술개발을 통하여 현장 상용화가 이루어지려면 3년 정도의 기간이 필요하며, 이를 위한 기술적 투자가 절실함.
- 또한 곧 개통하는 원주-강릉 신선 등을 대비하여 시운전시험 중에 설치가 용이한 미기압과 후드의 첨단재료 및 급속시공기술 개발이 시급한 실정임.

## 2. 국토부 주도의 개발 및 지원 필요성

- 현재 200km/h급과 250km/h급으로 설계중인 중앙선 도담-영천 철도건설, 중부내륙 이천-충주 철도건설, 동해선 포항-삼척 철도건설과 건설 중인 원주-강릉 신선 등은 콘크리트케도를 적용하기 시작하였고, 전체 철도건설비를 절감하고자 복선 및 단선의 터널단면적을 최소내공단면적(단선 40m<sup>2</sup>, 복선 66m<sup>2</sup>)으로 설계되고 있어서 100여개소 이상의 터널 입/출구 주변민가에 터널 미기압파라는 충격성 소음/진동 피해가 크게 발생될 것으로 예상되므로 정부지원의 저감대책 마련이 시급하고 절실히 필요함.
- 신규철도노선에서 전체 철도건설비를 절감하고자 최소 터널단면적으로 설계를 결정한 후의 문제점인 터널 미기압과 환경소음/진동 문제는 정부에서 효율적이고 저렴한 대책으로 지원 유도할 필요성이 있음.
- 터널 미기압과 저감 후드의 실용화 기술은 표준도면, 공사 시방서, 후드를 적용하는 경우의 분석 및 평가방법 등이 종합적으로 포함되어야 하며, 국가 연구개발과제를 통해 이를 구현하여 표준설계지침을 마련할 경우, 설계 및 시공현장에서의 혼선을 최소화하고 이에 대한 공신력을 확보할 수 있는 장점이 있음. 따라서 본 대책기술은 국가지원에 의하여 개발되어야 하며, 국가주도 보급기술이 되어야 할 필요성이 절실함.

### 3. 정부 미지원시 문제점

- 미기압과 관련 기술은 국가 간선철도망과 관련된 기술이며, 민간주도로 개발되어 특정 업체 및 기관의 독점공급기술이 되는 경우에는 건설시 민간업체와 발주기관과의 마찰 소지가 있으며, 실제적인 적용 시에도 비용절감효과가 감소되어 국가 예산집행의 효율성 및 기술보급 측면에서 불리한 측면이 있을 것으로 예상됨.
- 또한, 본 개발기술은 운영중인 철도터널의 문제해결을 위한 기술로도 활용이 가능하므로 향후 지속적인 철도고속화를 위해서도 정부주도의 기술개발이 절실히 필요함.

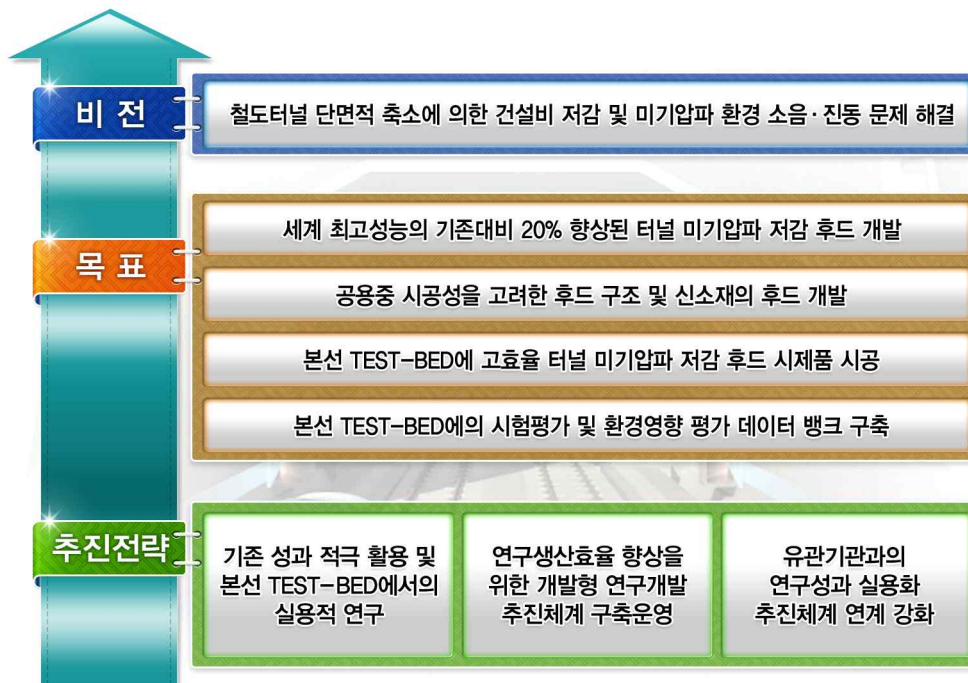
## 4장 연구개발과제 구성 및 추진전략

### 1절 비전 및 최종목표

#### 1. 비전 및 최종목표

가. 연구개발 비전

- 터널 미기압과 저감 대책의 성능 및 건설비 최적화를 위한 실용화 기술개발사업의 정의 및 사업 목적에 맞추어 동 사업의 비전, 목표 및 추진전략을 다음과 같이 설정



- 철도터널 단면적 축소에 의한 건설비 저감 및 기존 고속철도 속도향상 시의 문제점인 민가에 미치는 터널 미기압과 환경 소음·진동 문제를 저렴한 대책으로 해결하는 것을 본 연구의 비전으로 삼음.
- 민가에 미치는 터널 미기압과 환경 소음·진동 문제를 해결하고자 하는 비전을 실현하기 위해 터널 미기압과 저감대책 시스템엔지니어링 과정을 정립하고 경량화 설계 및 공용중 시공기법 개발, 환경영향평가기법 및 검증, TEST-BED 현장계측 데이터 뱅크 구축의 핵심기술 개발을 목표로 함

- 핵심기술 개발을 위한 전략으로서, 실용화 및 TEST-BED 구축을 고려하여 시스템엔지니어링 프로세스에 따른 복합재료 적용의 공용중 시공기술을 개발하고자 함
- 터널 미기압과 저감 대책 기술을 구성하는 하위기술 간의 인터페이스 성능을 검증하고 타이트한 저감 성능 확보를 위해 시뮬레이션 기술을 개발하고자 함
- 국내 최소단면 철도터널에서 고속화 운영에 대한 성능확보 검증을 위해 축소모형의 열차모델 터널 주행시험기(moving model rig)를 활용하고, TEST-BED에서의 실증시험을 실시하는 것을 또 하나의 목표로 함
- 터널 미기압과 저감대책의 실제 설계를 위한 기준 및 시공을 위한 시방서를 작성함.
- TEST-BED에서의 실대형 터널 미기압과 저감대책 구축을 위한 설계도를 작성하고 시공하여 완성함.
- 축소 실증모형의 터널 주행시험과 실대형 후드의 TEST-BED에서의 시험평가를 실시하여 검증함.

나. 최종 목표

- 최근 국·내외 터널 설계 추세가 내공 단면적 축소를 통한 건설비 절감, 유지관리의 효율성을 고려한 콘크리트궤도 공법 적용 그리고 열차의 고속화 추세임. 이 때 나타나는 문제점인 터널 미기압과 환경 소음·진동 문제를 저렴한 대책으로 실용화하는 핵심기술 개발 기획

목표 1	다양한 연장의 소단면 터널들의 고속철도 Test-bed 구성을 통한 터널 미기압과 상시 모니터링 시스템 구축 및 실선로 시험평가, DB 뱅크 구축
목표 2	공용중 시공성을 고려한 구조 및 소재의 터널 미기압과 저감 후드 핵심성능평가 및 시제품 개발
목표 3	세계 최고성능의 기존 후드 대비 20% 향상된 터널 미기압과 저감 후드 실용화 기술개발

## 2. 단계별 연구목표 및 내용

### 가. 1단계 연구목표 및 내용(3년)

1단계 연구목표	주요 연구내용
<p>준고속철도용 터널 미기압파 저감 대책 실용화 기술개발</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>250km/h급 고효율 후드의 실용화를 위한 통합설계 및 평가 기술개발</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>· 국내외 현장시험 데이터의 분석으로 환경영향평가 경험식의 경험상수 평가</li> <li>· 초고속 터널주행 열차모델 시험장치에 1/60축척 실험상 터널 및 후드 설계/제작, 실용화 성능평가</li> <li>· 초고속 터널주행 열차모델 시험장치에 의한 TEST-BED 사양의 1/60 축척 사갱 및 기재갱의 실용화 성능평가</li> <li>· 차세대 고효율 후드의 경제성 평가에 의한 기술가치 평가</li> <li>· 환경영향평가 경험식의 경험상수 평가에 대한 CFD해석 검증</li> <li>· 주변민가에 미치는 터널 미기압파 환경영향평가의 상용화 S/W 개발</li> <li>· 후드의 첨단소재 및 슬림화 구조 검토 및 적용성 평가</li> <li>· 주변 환경과 어울리는 후드 스타일링 산업디자인 수행</li> <li>· 적용소재에 안정성과 신뢰성이 검증된 후드 1차 시작품 제작(1/10 축척~1/70축척)</li> <li>· 본선 TEST-BED 시제품 현장시험의 장거리 모니터링시스템(성능평가) 구축</li> <li>· 250km/h급 운행에서 터널 미기압파 허용기준의 지원 및 개정(안)</li> <li>· 본선 TEST-BED에서 시제품의 시험평가 모니터링 수행 및 시험결과 분석</li> </ul> </li> <li>▪ <b>250km/h급 고효율 후드의 공기역학적 성능평가 및 모니터링 기술개발</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>· 3D CFD 해석에 의한 고효율 후드 구조체의 공기역학적 성능평가기법 개발</li> <li>· 본선 TEST-BED에서의 다목적 시험용 후드의 통풍관 개구부의 면적 원격제어 및 계측 인터페이스 설계 연구</li> <li>· 본선 TEST-BED에서의 계측지그, 시그널 케이블링 배치, 콘트롤 박스 구성 및 인터페이스 설계(주관기관 중앙모니터링-빅데이터의 LTE급 무선전송 시스템)</li> <li>· 본선 TEST-BED에의 다목적 시험용 후드의 주관기관 중앙 모니터링 S/W 작성 및 구축, 빅데이터 분석/처리</li> <li>· 본선 Test-Bed 노선 터널들의 사양, 사갱, 기재갱, 터널 주변 민가 및 이격거리 도면화, 데이터 베이스화</li> </ul> </li> <li>▪ <b>국내 고속열차 차량 특성과 철도터널 주변 환경에 대한 미기압파 민감도 연구</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>· TEST-BED 노선의 터널 출구갱문 형상에 따른 미기압파 3차원 방사패턴 분석연구</li> </ul> </li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>· TEST-BED 노선의 터널 출구외부 지형환경에 따른 미기압파 3차원 방사패턴 연구</li> <li>· 국내 콘크리트 궤도 터널의 터널내 상세사양에 대한 방사 미기압파의 주파수 특성 연구</li> <li>· 250km/h급 국내외 고속열차와 터널 사양에 대한 방사 미기압파 크기의 비교 연구</li> <li>· 미기압파의 크기 및 FFT 분석에 따른 국내 민가분포 특성에 미치는 영향 평가</li> <li>▪ <b>250km/h급 고효율 후드의 실용화 구조안정성 및 공용중 시공성 향상 기술개발</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>· 운행 중인 철도노선에서의 터널입구 후드의 저비용 설치 소재/시공법 개발</li> <li>· 터널입구 후드의 교량설치 구조설계/시공 향상기술 개발</li> <li>· 후드의 첨단소재 검토 및 슬림화 구조 후드의 공진방지 및 내진성능 해석평가 및 시험평가 모니터링, 시험결과 분석</li> <li>· 본선 TEST-BED에서의 구조안정성 및 시공성 향상 기술 연구</li> <li>· 본선 TEST-BED 현장시험의 다목적 시험용 후드의 실시 설계도면 작성</li> <li>· 250km/h급 실용화를 위한 최적설계의 고효율 후드의 실시설계 도면 작성</li> <li>· 콘크리트 후드와 강구조 후드 등에 대한 안전기준 및 지침 마련</li> </ul> </li> </ul>
--	--

○ 1단계 기술개발의 TRL에 근거한 연구개발 단계

구분		표기	단계별 설명	
기초연구 단계	TRL 1	<input type="checkbox"/>	TRL 1	이론적 연구단계
	TRL 2	<input type="checkbox"/>	TRL 2	기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	<input type="checkbox"/>	TRL 3	실험적 증명 단계
	TRL 4	<input type="checkbox"/>	TRL 4	실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	<input checked="" type="checkbox"/>	TRL 5	유사환경 시험 단계
	TRL 6	<input checked="" type="checkbox"/>	TRL 6	유사환경 기술시험 단계
실용화 단계	TRL 7	<input checked="" type="checkbox"/>	TRL 7	실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	<input checked="" type="checkbox"/>	TRL 8	시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	<input type="checkbox"/>	TRL 9	현장적용/사업화 단계

- 차세대 고성능 터널 미기압파 저감 후드기술은 원천기술에 대하여 TRL 4의 실험실 성능평가 단계가 끝나고, 본 과제의 실용화 기술개발 시작되면 TRL 5 ~ TRL 8의 기술개발을 수행하게 됨.

나. 2단계 연구목표 및 내용(2년)

2단계 연구목표	주요 연구내용
300km/h급 이상의 터널 미기압파 저감 대책 실용화 기술개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 300km/h급 이상 터널 미기압파 저감 대책의 실용화 기술개발               <ul style="list-style-type: none"> <li>· 현장실험 데이터뱅크에 의한 터널 미기압파 환경영향평가 S/W의 업그레이드</li> <li>· 실용화를 위한 터널주행 열차모델 주행시험에 의한 최적설계 및 1차 성능검증</li> <li>· 300km/h급 이상 운행에서 터널 미기압파 허용기준의 지원 및 개정</li> </ul> </li> <li>▪ 300km/h급 이상 터널 미기압파 저감 대책의 성능과 안정성 확보를 위한 실증시험               <ul style="list-style-type: none"> <li>· 본선 시험부설 TEST-BED 구축</li> <li>· 시제품 제작시공(현장 시험부설), 현장시험 및 평가</li> <li>· 300km/h급 이상의 현장시험 데이터뱅크 확보</li> </ul> </li> </ul>

○ 2단계 기술개발의 TRL에 근거한 연구개발 단계

구분		표기	단계별 설명	
기초연구 단계	TRL 1	□	TRL 1	이론적 연구단계
	TRL 2	□	TRL 2	기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	□	TRL 3	실험적 증명 단계
	TRL 4	□	TRL 4	실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	□	TRL 5	유사환경 시험 단계
	TRL 6	□	TRL 6	유사환경 기술시범 단계
실용화 단계	TRL 7	□	TRL 7	실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	■	TRL 8	시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	■	TRL 9	현장적용/사업화 단계

## 2절 추진전략

### 1. 연구개발과제 구성

분야	세부 연구추진 대상내용	비고
<p>고효율 후드의 실용화를 위한 통합설계 및 평가 기술</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TEST-BED 터널 사양의 초고속 터널주행 열차모델 시험 수행               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1/60축척 실험상 터널의 사경 및 기재경의 실용화 성능평가</li> <li>- 1/60축척 실험상 터널 및 차세대 후드 설계/제작, 실용화 성능평가</li> </ul> </li> <li>• 차세대 고효율 후드의 경제성 평가에 의한 기술가치 평가</li> <li>• 국내외 현장시험 데이터 분석으로 환경영향평가 경험식의 경험상수 평가               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 터널갱구 외부지형에 대한 입체각 및 미기압파 주파수 분석으로 미기압파의 민가에 미치는 기여도 분석/평가</li> <li>- 환경영향평가 경험식의 경험상수 평가에 대한 CFD해석 검증</li> </ul> </li> <li>• 국내 고속열차 차량 특성과 철도터널 주변 환경에 대한 미기압파 민감도 연구               <ul style="list-style-type: none"> <li>- TEST-BED 노선의 터널 출구갱문 형상에 따른 미기압파 3차원 방사패턴 분석연구</li> <li>- TEST-BED 노선의 터널 출구외부 지형환경에 따른 미기압파 3차원 방사패턴 연구</li> <li>- 국내 콘크리트 궤도 터널의 터널내 상세사양에 대한 방사 미기압파의 주파수 특성 연구</li> <li>- 250km/h급 국내외 고속열차와 터널 사양에 대한 방사 미기압파 크기의 비교 연구</li> <li>- 미기압파의 크기 및 FFT 분석에 따른 국내 민가분포 특성에 미치는 영향 평가</li> </ul> </li> <li>• 주변민가에 미치는 터널 미기압파 환경영향평가의 상용화 S/W 개발               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 터널갱구에서 방사되는 미기압파에 대한 환경영향평가 역해석 프로그램 상용화 개발(일본 신칸센 및 원주-강릉 현장시험데이터뱅크 적용)</li> </ul> </li> <li>• 터널 미기압파 저감 후드의 첨단소재 및 슬림화 구조 검토 및 적용성 평가               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 공용중 시공이 간편한 터널 미기압파 저감 후드 첨단소재 및 구조 검토 및 적용성 평가</li> </ul> </li> <li>• 주변 환경과 어울리는 후드 스타일링 산업디자인 수행</li> <li>• 적용소재에 안정성과 신뢰성이 검증된 후드 1차 시제품 제작(1/10축척~1/70축척)</li> <li>• 본선 TEST-BED 시제품 현장시험의 장거리 원격 모니터링시스템(성능평가) 구축               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 원주-강릉 TEST-BED에서의 터널 연장별로 6개 분류로 원격 상시 모니터링 시스템 구축 및 설치로 열차 운행패턴별, 기상조건에 따른 미기압파의 변화 크기를 계측 규명하고 데이터 뱅크화</li> </ul> </li> <li>• 250km/h급 운행에서 터널 미기압파 허용기준의 지원 및 개정(안)</li> </ul>	

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 원주-강릉 TEST-BED에서의 터널 연장별, 터널출구 외부 지형환경에 대한 현장시험을 통하여 민가에 미치는 민강도를 연구하여 미기압파 허용기준 개정안 도출</li> <li>• 본선 TEST-BED에서 시제품의 시험평가 모니터링 수행 및 시험결과 분석</li> </ul>	
공기역학적 성능평가기준	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 압축파의 터널내 전파 및 반사 해석기술 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 터널 입/출구 형상 및 내부 구조물에 따른 전파 및 반사 해석기술</li> </ul> </li> <li>• 터널 연장에 따른 압축파 증폭현상 해석</li> <li>• 미기압파 해석 소프트웨어 개발을 위한 해석적 DB 확보 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 국내 시공된 터널에 대하여 실측 값과 해석 값 비교</li> <li>- 대표 값에 대한 보정</li> <li>- 해석적 방법을 통한 변수 보정에 의한 데이터 베이스화</li> </ul> </li> </ul>	
모니터링 시스템 설계기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 현장 데이터 취합 및 손실방지기술 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 터널 현장 상황에 적합한 데이터 취합, 전송주기 및 전송방법</li> </ul> </li> <li>• 무선송신 및 클라우드 저장 및 DB 구축기술 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 대용량 데이터 저장 및 DB처리기술</li> </ul> </li> <li>• 자동확장 클라우드 생성 및 데이터 정리기술 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 다수 터널에 대한 빅데이터 관리기술</li> </ul> </li> </ul>	
설계 및 시공기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 후드의 구조설계기준 제시 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 고속열차의 풍하중을 지명할 수 있고, 국내 지진 특성에 부합하는 내풍 및 내진설계기준 개발</li> <li>- 터널과 사용수명을 동일하게 간주하고 충분한 노출환경등급과 피복 등급을 가지는 내구성 설계기준 수립</li> </ul> </li> <li>• 건설비 효율화를 위한 저비용설계 및 시공기술 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 공법별 재작 및 가설비용을 최소화하기 위한 최적화 기법을 적용한 공정 분석 및 개발</li> </ul> </li> <li>• 운영중인 노선에 시공가능한 공법 및 시공기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 열차 운행중인 터널의 고속화에 대비하여 운영에 지장을 초래하지 않고 시공이 가능한 시공법 및 관련 설계, 시공기술 개발</li> </ul> </li> </ul>	

## 2. 목표성과물

가. 주요 연구개발 성과물

- 초고속 터널주행 열차모델 시험장치에 1/60축척 실험상 터널 및 후드 설계/제작물
- 주변 환경과 어울리는 후드 스타일링 산업디자인 결과물
- 250km/h급 실용화를 위한 최적시험설계의 고효율 후드 실시설계도면
- 주변민가에 미치는 터널 미기압파 환경영향평가의 상용화 S/W
- 차세대 고효율 후드의 경제성 평가에 의한 기술가치 평가 보고서
- 3D CFD 해석에 의한 고효율 후드 구조체의 공기역학적 성능평가기법 보고서
- 본선 TEST-BED 시제품의 장거리 모니터링시스템(성능평가) 설계 및 데이터 무선전송

시스템 설계도 및 사양서

- 본선 TEST-BED의 중앙모니터링을 위한 소프트웨어 및 Web Page 마련
- 본선 TEST-BED노선 터널 사양, 구조물, 터널주변 보안물건에 대한 도면화 및 데이터 베이스
- 국내 운행 고속열차와 철도터널 내부 및 터널 외부 지형환경에 대한 터널 미기압과 특성에 대한 보고서
- 운행 중인 철도노선에서의 터널입구 후드의 저비용 설치 소재/시공법
- 터널입구 후드의 교량설치 구조설계/시공 향상기술 보고서
- 첨단소재/슬림화 구조 후드의 공진방지 및 내진성능 평가기술 보고서
- 콘크리트 후드와 강구조 후드 등에 대한 안전기준 및 지침
- 현장적용 설계도면 작성(후드의 표준도면, 상세도, 수량산출서 및 내역서 작성)
- 적용소재에 안정성과 신뢰성이 검증된 후드 시제품
- 본선 시험부설 TEST-BED에서의 현장시험 및 평가기술 보고서
- 후드 시제품을 본선 시험부설 TEST-BED에 구축
- 250km/h급 운행에서 터널 미기압과 허용기준의 지원 및 개정(안)

### 3. 주요내용 및 추진전략

가. 연구개발과제 주요내용

구분	주요내용
총괄	준고속철도용 터널 미기압파 저감 대책 실용화 기술개발
주관기관	250km/h급 고효율 후드의 실용화를 위한 통합설계 및 평가 기술개발
1	국내외 현장시험 데이터의 분석으로 환경영향평가 경험식의 경험상수 평가
2	초고속 터널주행 열차모델 시험장치에 1/60축척 실험상 터널 및 후드 설계/제작, 실용화 성능평가
3	초고속 터널주행 열차모델 시험장치에 의한 TEST-BED 사양의 1/60축척 사갱 및 기재갱의 실용화 성능평가
4	환경영향평가 경험식의 경험상수 평가에 대한 CFD해석 검증
5	주변민가에 미치는 터널 미기압파 환경영향평가의 상용화 S/W 개발
6	후드의 첨단소재 및 슬림화 구조 검토 및 적용성 평가
7	차세대 고효율 후드의 경제성 평가에 의한 기술가치 평가
8	주변 환경과 어울리는 후드 스타일링 산업디자인 수행
9	적용소재에 안정성과 신뢰성이 검증된 후드 1차 시제품 제작(1/10~1/70축

	척)
10	본선 시험부설 TEST-BED에서의 현장시험 및 평가기술 개발
11	1:1 실척 후드 시제품을 본선 TEST-BED에 구축
12	본선 TEST-BED 시제품 현장시험의 장거리 모니터링시스템(성능평가) 구축
13	250km/h급 운행에서 터널 미기압파 허용기준의 지원 및 개정(안)
14	본선 TEST-BED에서 시제품의 시험평가 모니터링 수행 및 시험결과 분석, 최종보고서 작성
<b>위탁과제-1</b>	<b>250km/h급 고효율 후드의 공기역학적 성능평가 및 모니터링 기술개발</b>
1-1	3D CFD 해석에 의한 고효율 후드 구조체의 공기역학적 성능평가기법 개발
1-2	본선 TEST-BED에서의 다목적 시험용 후드의 통풍관 개구부의 면적 원격제어 및 계측 인터페이스 설계 연구
1-3	본선 TEST-BED에서의 계측지그, 시그널 케이블링 배치, 콘트롤 박스 구성 및 인터페이스 설계(주관기관 중앙모니터링-빅데이터의 LTE급 무선전송 시스템)
1-4	본선 TEST-BED에의 다목적 시험용 후드의 주관기관 중앙 모니터링 S/W 작성 및 구축, 빅데이터 분석/처리
1-5	본선 Test-Bed 노선 터널들의 사양, 사갱, 기재갱, 터널 주변 민가 및 이격거리 도면화, 데이터 베이스화
<b>위탁과제-2</b>	<b>국내 고속열차 차량 특성과 철도터널 주변 환경에 대한 미기압파 민감도 연구</b>
2-1	TEST-BED 노선의 터널 출구갱문 형상에 따른 미기압파 3차원 방사패턴 분석연구
2-2	TEST-BED 노선의 터널 출구외부 지형환경에 따른 미기압파 3차원 방사패턴 연구
2-3	국내 콘크리트 궤도 터널의 터널내 상세사양에 대한 방사 미기압파의 주파수 특성 연구
2-4	250km/h급 국내외 고속열차와 터널 사양에 대한 방사 미기압파 크기의 비교 연구
2-5	미기압파의 크기 및 FFT 분석에 따른 국내 민가특성에 미치는 영향 평가
<b>위탁과제-3</b>	<b>250km/h급 고효율 후드의 실용화 구조안정성 및 공용중 시공성 향상 기술개발</b>
3-1	운행 중인 철도노선에서의 터널입구 후드의 저비용 설치 소재/시공법 개발

3-2	터널입구 후드의 교량설치 구조설계/시공 향상기술 개발
3-3	후드의 첨단소재 검토 및 슬림화 구조 후드의 공진방지 및 내진성능 해석평가 및 시험평가 모니터링, 시험결과 분석
3-4	본선 TEST-BED 현장시험의 다목적 시험용 후드의 실시 설계도면 작성/제출
3-5	본선 TEST-BED에 구조안정성 및 시공성 향상 기술 적용
3-6	250km/h급 실용화를 위한 최적설계의 고효율 후드의 실시설계 도면 작성/제출
3-7	콘크리트 후드와 강구조 후드 등에 대한 안전기준 및 지침 마련

#### 나. 추진체계

##### (1) 확보기술 실용화 전략

- 확보된 터널 미기압과 저감 대책 원천기술(후드 등)은 터널주행 열차모델 시험기(moving model test rig)에 이용하여 개발되었고, 10여년전에 개발한 수직 통풍관형 후드를 시범설치한 호남고속철도 현장시험에서 효용성은 증명되었으나, 실제 현장운용에서 최고성능을 발휘하려면 현장에서 통풍공 사이즈를 조절할 수 있어야 한다는 판단이 정립되었다. 수직 통풍관형 후드의 단점은 현장에서 통풍공 사이즈를 조정하기가 어렵다는 문제점을 가지고 있어, 2014년형 차세대 고효율 후드는 상부가 아닌 후드 측벽에서 조정이 가능하도록 원천기술을 개발하였기에 TEST-BED 현장시험에서 최고성능 도출이 가능하다.
- 공기역학적 성능 평가기준 및 전산유체역학 기술은 기술개발 시 기술의 보급이 가능하다는 점이 전제되어야 한다. 터널내 압축파를 예측하는 해석기술은 여러 가지 방법이 개발되어 있지만 해석자에 따라 일관된 결과를 취득하기 어렵고, 단순조건에 대한 해석을 주로 수행하였으므로 현재까지 도출된 결과가 넓은 범위의 조건들을 감안하지 못한 문제점이 있다.
- 또한 전산유체 해석자체가 축소모델 실험이나 현장 실측값을 추종할 수 밖에 없기 때문에 신뢰성 있는 실측치의 표준을 세우고 이를 토대로 해석인자를 결정할 수 있도록 연구하는 것이 필요하다.
- 현장 실측은 많은 횟수의 반복을 통하여 표준화된 결과를 얻어야하기 때문에 상시 모니

터링 시스템과 연계한 기초데이터 확보가 매우 중요하다고 볼 수 있고 연관시켜 연구하는 전략을 수립하여야 한다.

- 원격의 모니터링 시스템의 설계기술은 터널이라는 특성을 감안하여 통신프로토콜 및 전송방법을 개발하여야 하며, 빅데이터 수집전략을 수립하여 측정된 데이터의 분석, 활용이 가능한 상시 분석 시스템을 구축하는 것이 중요하다.
- 터널 출구 미기압과에 대한 모니터링 시스템은 세계적으로도 유례가 없는 사례로 국내 철도 공기역학 관련기술을 한 단계 도약시키는 지름길이 될 수 있다.
- 또한 최근 급속히 발전하고 있는 국내 무선통신기술 및 클라우드 저장기술 등을 활용하여 신개념의 설계기술을 개발하여 접목시키는 전략이 바람직할 것이다.
- 터널 미기압과 저감 후드의 시공기술은 기존의 개착식 터널의 시공기술과 유사한 측면이 있고 또한 후드를 철골 구조물 기술로도 시공이 가능하다. 국토의 대부분이 산악지형이 국내의 여건상 터널공법에 관한 국내의 시공기술 수준은 일정수준에 도달해 있는 실정이다. 다만, 터널 미기압과의 저감과 같은 특정 목적을 위해 설치되는 후드와 같이 임의 위치의 개구부에 대한 보강기술이나 후드 구조물을 설치하기 위한 공용 중에 있는 기존터널의 노반에 피해를 주지 않고 기초부를 형성하는 시공기술 등에 대한 추가 연구 개발이 요구되는 상황이다.
- 또한 공용중에 후드를 설치하려면 단순화된 철골 구조물에 복합소재 등을 활용한 경량화 데크 플레이트나 멤브레인으로 마감하는 방법을 검토해야 하는데, 공용중인 철도터널 앞쪽의 철도시설을 대형 크레인 진입으로 훼손하지 않고 공사가 이루어지려면 이에 대한 설계기술과 시공기술 연구가 필요하다.

## (2) 성과관리 방안

### (가) 성과평가 및 관리

- 본 사업은 국가연구 개발사업 조사·분석·평가의 성과지표를 참조하여 기본지표로 설정
  - 공통적인 성과부분을 평가하고, 각 세부사업별 특성화된 성과부분을 추가지표로 설정하여 성과를 효과적으로 측정
  - 세부사업별로 지표에 가중치를 차등 부여하여 성과측정의 실효성을 제고

### (나) 성과지표(안)

- 도출된 성과지표는 고정된 것이 아니며, 추후 지속적인 검토 및 시범적용을 통해 더 효율적이고 적합한 성과지표로 수정·보완

표 4.2.1 철도인프라 성능 및 건설비 최적화를 위한 기반기술 개발사업 성과지표(안)

성과항목	성과지표	
1. 지식재산권	1-1	특허 출원 건수
	1-2	특허 등록 건수
	1-3	특허 등록률
	1-4	연구비 1억원 당 특허 출원 건수
	1-5	연구비 1억원 당 특허 등록 건수
2. 논문	2-1	학술지 게재 논문 건수
	2-2	SCI급 학술지 게재 논문 건수
	2-3	연구비 1억원당 학술지 게재 논문 건수
	2-4	연구비 1억원 당 SCI급 학술지 게재 논문 건수
3. 표준 및 기준	3-1	표준 제안 건수
	3-2	표준 제정/개정 건수
	3-4	기준의 법제화 건수
	3-5	국제 표준화 회의 유치/개최 건수
4. 매뉴얼	4-1	매뉴얼 작성 건수
	4-2	매뉴얼 활용 실적
5. 기술이전/거래	5.1	기술이전 건수
	5.2	기술료 수입액

① 지식 재산권

Ⓐ 특허 출원 건수 : 사업 수행기간 및 사후 평가기간 동안 출원된 특허건수

○ 측정방법

- (과제) 해당 과제 통해 출원된 특허출원 건수
- (사업) 세부과제들의 특허 출원건수의 합

○ 근거자료 : 특허 출원증 사본

- 출원 특허명, 출원인, 출원등록번호, 출원일 등

Ⓑ 특허 등록 건수 : 사업 수행기간 및 사후 평가기간 동안 등록된 특허건수

○ 측정방법

- (과제) 해당 과제 통해 등록된 특허출원 건수
- (사업) 세부과제들의 특허 등록건수의 합

○ 근거자료 : 특허 등록증 사본

- 특허명, 출원인, 등록번호, 등록일 등

Ⓒ 특허 등록률 : 해당 사업으로부터 얻은 특허의 출원 건수 대비 등록 건수의 비율

○ 측정방법

- 해당 사업에서 지원된 과제들의 특허등록률의 평균 : (출원한 특허 가운데 통계마감일까지 등록된 건수 / 출원한 특허건수) × 100

○ 근거자료 : : 특허 출원·등록증 사본

- 특허명, 출원인, 출원등록번호, 출원일, 등록번호, 등록일 등

㉑ 연구비 1억원 당 특허 출원 건수

- 측정방법 : 연구비 1억원 당 사업 수행기간 및 사후 평가기간 동안 출원된 특허건수
  - 총 특허출원 건수/총 연구 사업비(단위: 1억원)
- 근거자료 : 특허 출원증 사본 및 투입 연구비 DB
  - 출원 특허명, 출원인, 출원등록번호, 출원일 등

㉒ 연구비 1억원 당 특허 등록 건수

- 측정방법 : 연구비 1억원 당 사업 수행기간 및 사후 평가기간 동안 등록된 특허건수
  - 총 특허등록 건수/총 연구 사업비(단위: 1억원)
- 근거자료 : 특허 등록증 사본 및 투입 연구비 DB
  - 특허명, 출원인, 등록번호, 등록일 등

② 전문학술지

㉓ 학술지 게재 논문 편수 : 국내 및 국외 학술지에 게재된 논문 건수

- 측정방법
  - (과제) 국내/국외, SCI급/비SCI급 학술지를 구분하여 논문 게재 편수 평가
  - (사업) 동 사업 세부과제들의 학술지 게재 논문편수의 합
- 근거자료 : 학술지 표지, 목차 사본
  - 저자, abstract, SCI(E)에 등재된 학술지 명칭, 게재연월일, Vol(No)&시작-끝 페이지, acknowledgement(동 사업 지원 사실 포함) 등

㉔ SCI급 학술지 게재 논문 편수 : SCI급 학술지 게재 논문편수

- 측정방법
  - (과제) 국내외 SCI급 학술지 게재 논문편수
  - (사업) 동 사업 세부과제들의 SCI급 학술지 게재 논문편수의 합
- 근거자료 : 학술지 표지, 목차 사본
  - 저자, abstract, SCI(E)에 등재된 학술지 명칭, 게재연월일, Vol(No)&시작-끝 페이지, acknowledgement(동 사업 지원 사실 포함) 등

㉕ 연구비 1억원 당 학술지 게재 논문 편수 : 연구비 1억원 당 평균 국내 및 국외 학술지에 게재된 논문 편수

- 측정방법
  - 국내/국외, SCI급/비SCI급 학술지를 구분하여 논문 게재 건수와 함께 연구비 당 논문 편수
- 근거자료 : 학술지 표지, 목차 사본 및 투입 연구비 DB
  - 저자, abstract, SCI(E)에 등재된 학술지 명칭, 게재연월일, Vol(No)&시작-끝 페이지, acknowledgement(동 사업 지원 사실 포함) 등

㉖ 연구비 1억원 당 SCI급 학술지 게재 논문 편수 : 연구비 1억원당 평균 SCI급 학술지에 게재된 논문 편수

○ 측정방법

- SCI급 학술지에 게재된 논문 편수와 함께 연구비당 논문 편수

○ 근거자료 : 학술지 표지, 목차 사본 및 투입 연구비 DB

- 저자, abstract, SCI(E)에 등재된 학술지 명칭, 게재연월일, Vol(No)&시작·끝 페이지, acknowledgement(동 사업 지원 사실 포함) 등

③ 표준 및 기준

④ 표준 제안 건수 : 해당 사업을 통해 발생한 연구 성과에 대해 국내/국제 표준화기구에 표준안을 제안하고 제안한 표준안이 채택된 건수

○ 측정방법

- 해당 사업에서 지원된 과제들의 국내/국제 표준 제안/채택 건수의 합

○ 근거자료 : 표준 제안서 및 증빙서류

- 제안 표준명, 표준화 기구명, 표준번호, 채택일 등을 확인할 수 있는 증빙서류

⑤ 표준 제정/개정 건수 : 해당 사업을 통해 획득한 연구결과를 체계적이고 계획적인 표준화 활동을 통해 표준 제정/개정된 건수

○ 측정방법

- 해당 사업에서 지원된 과제들의 국내/국제 표준 제정/개정 건수의 합

○ 근거자료 : 표준 제/개정서 및 증빙서류

- 제정/개정 제안 표준명, 표준화 기구명, 표준번호, 제정/개정일 등을 확인할 수 있는 증빙서류

⑥ 기준의 법제화 건수 : 해당 사업을 통해 획득한 연구결과를 정부 및 국내표준화기구에서 표준/기준으로 법제화한 건수

○ 측정방법

- 해당 사업에서 지원된 과제들의 국내/국제 표준/기준 법제화 건수의 합

○ 근거자료

- 표준/기준명, 표준화 기구명, 표준번호 등을 확인할 수 있는 증빙서류

④ 매뉴얼

④ 매뉴얼 작성 건수 : 해당과제의 개발결과가 매뉴얼로 작성된 건수

○ 측정방법

- (과제) 관리 매뉴얼 개발 건수
- (사업) 세부과제들의 관리 매뉴얼 개발 건수 합

○ 근거자료 : 매뉴얼 첨부

- ③ 매뉴얼 활용 실적 : 사업을 통해 개발된 매뉴얼의 실제적으로 현장에 활용된 정도
  - 측정방법
    - 해당 과제에서 산출된 매뉴얼을 특정 웹사이트에 등록하고 매뉴얼의 다운로드 건수 측정
  - 근거자료 : 특정웹사이트를 통해 매뉴얼을 다운로드 건수
  
- ⑤ 기술이전/거래
  
- ④ 기술이전 건수 : 기술개발 결과물을 공개, 기술이전의 형태로 타 기관 (대학, 연구소, 기업 등)에 유/무상으로 이전하는 건수
  - 측정방법
    - (과제) 기술공개나 기술이전이 유/무상으로 행해진 건수
    - (사업) 세부과제들의 기술공개 및 기술이전(유/무상)건수의 합
  - 근거자료
    - 기술 소유권 이전 계약서 사본 첨부
    - 특허 사용 허가서 사본 첨부
    - 기술을 활용 제품 판권 계약서 사본 첨부
    - 기타 기술 이전 사실을 증명할 수 있는 증빙 서류 사본 첨부
  
- ⑥ 기술료 수입액 : 과제의 수행 결과 발생하는 총 기술료 수입액
  - 측정방법
    - (과제) 기술료 수입액 실적
    - (사업) 세부과제들의 기술료 수입액의 합
  - 근거자료
    - 기술료 입금 증명 서류 사본 첨부
    - 기술료 수익에 대한 세금 내역서 사본 첨부

#### 4. Test-Bed 전략

##### (1) Test-Bed 필요성

- 터널의 공사비 절감을 위한 최소단면 적용을 위해서는 미기압과 후드의 적용이 필수적이나, 적용 프로세스 기반이 취약하여 실제 적용에 어려움이 있는 실정임.
- 2017년 원주-강릉선을 시작으로 2025년 이후까지 많은 수의 노선이 개통예정으로 있으며, 200km/h이상의 고속열차 운행시에 미기압과 문제가 발생할 우려가 높으므로 기술개발을 통한 적용성 확보가 매우 시급한 실정임. 실용화에 따른 기술개발 기간 및 TEST BED를 통한 실용기술 확보를 통하여 현장적용이 이루어지려면 3년 이상의 기간이 필요하며, 이를 위한 기술적 투자가 절실함.

(2) Test-Bed 추진전략

- TEST BED는 개통예정인 터널에 미기압과의 상시 모니터링이 가능한 시스템을 구축하고 열차 운행조건 및 기상상태, 터널 출구 미기압과 및 터널내 압력변동 등을 측정할 수 있도록 구성하고, 열차 운행시 발생하는 미기압과를 중앙의 서버로 무선통신망을 이용하여 전송함.
- 이렇게 수집된 데이터는 분석작업을 거쳐 예측 알고리즘 제작에 적용되어 한국형 예측 소프트웨어를 구축하는데 이용됨.
- TEST-BED는 최소 6종류의 터널이 필요하며, 1km 이하의 짧은 터널, 3km급 터널, 4km/h급 터널, 8km/h급, 20km/h의 장대터널이 필요하고, 여기에 후드 설치된 터널과 미 설치된 터널로 구분하여 설치한다.

표 4.2.2 단선터널과 복선터널의 단면 예시

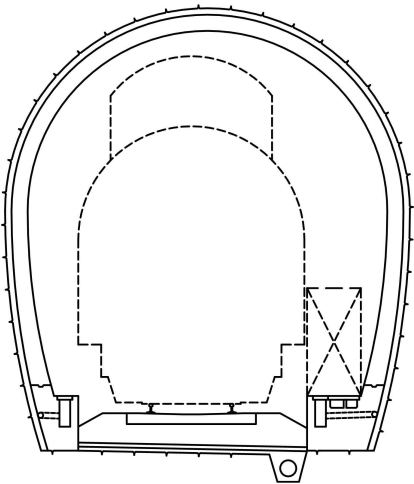
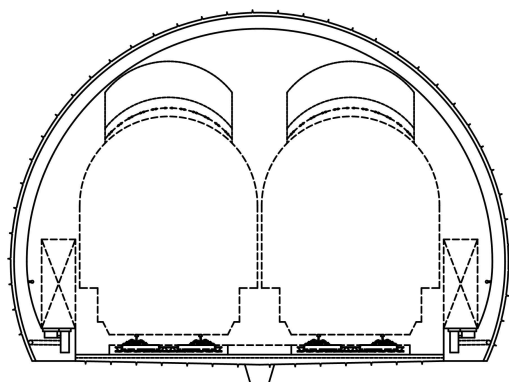
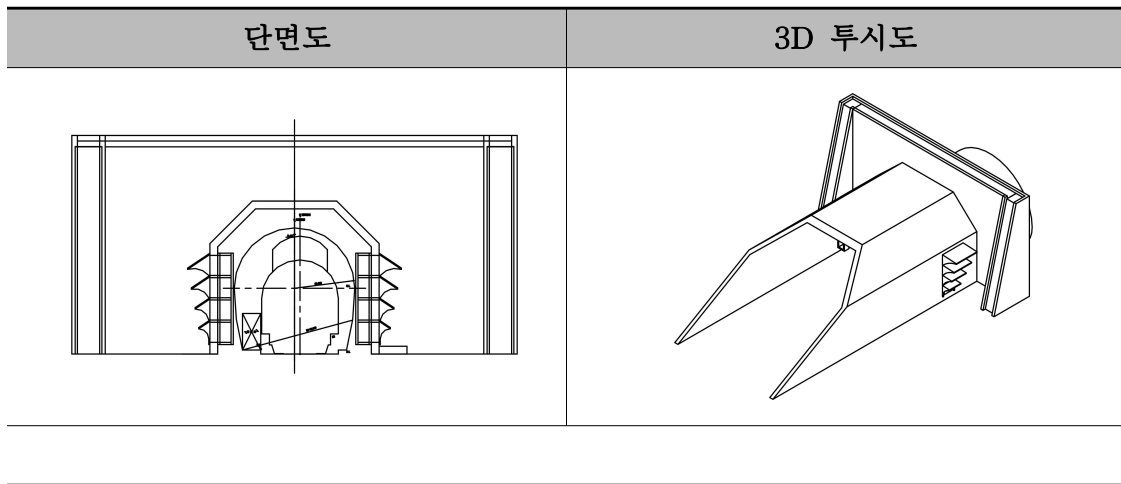
단선터널	복선터널
	
: 39.97㎡	내공단면적 : 65.74㎡
둘레길이 : 23.45m	둘레길이 : 31.12m

표 4.2.3 단선터널의 터널 미기압과 후드에 대한 예시



(3) TEST-BED 요구성능 및 추진체계

○ TEST-BED에 설치되는 센서 네트워크 및 모니터링 시스템은 다음과 같다.

- 시스템 기본 개요

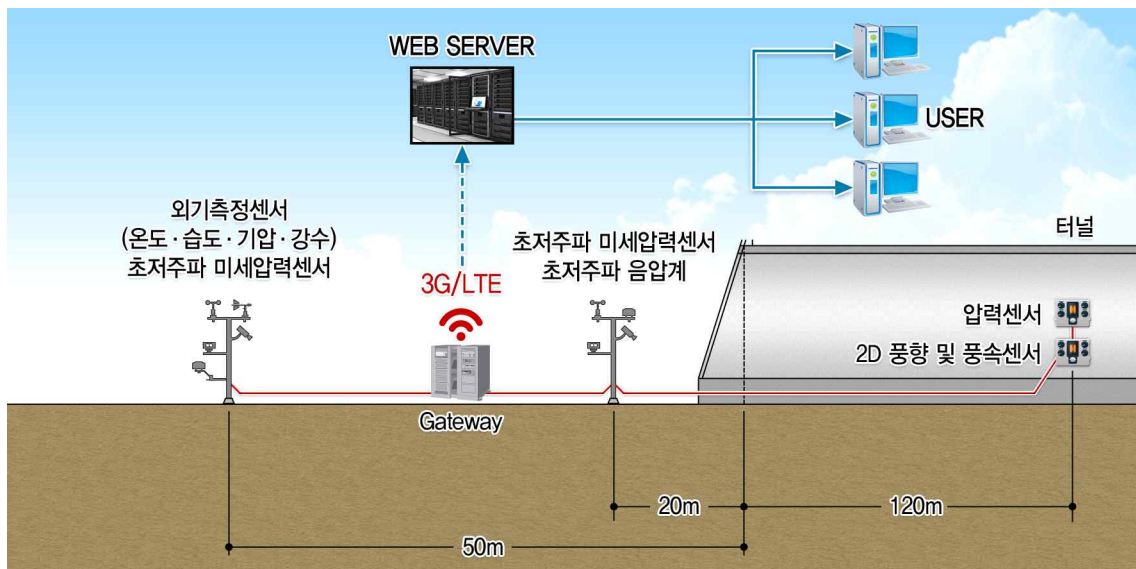


그림 4.2.1 후드가 설치되지 않는 터널의 센서배치도

- 센서 네트워크에서 게이트웨이까지는 유선네트워크로 구성하는 것이 안정성 측면에서 우수할 것으로 판단된다. 근거리무선네트워크 통신을 이용할 수 있으나, 터널내 전차선등으로 인한 전기장 및 자기장 문제와 전파간섭 등을 고려할 때 안정적인 통신방법을 선택하는 것이 유리하다.
- 게이트웨이에서 중앙 통제센터까지의 통신은 무선네트워크를 활용하는 것이 용이할 것으로 예상된다. 철도터널의 입출구부가 도시지역에 위치하는 경우가 드물어 통신 인프라가 구축된 지역이 아닐 가능성이 높으므로 모바일 네트워크

크를 활용하는 방안이 유리할 것으로 예상된다.

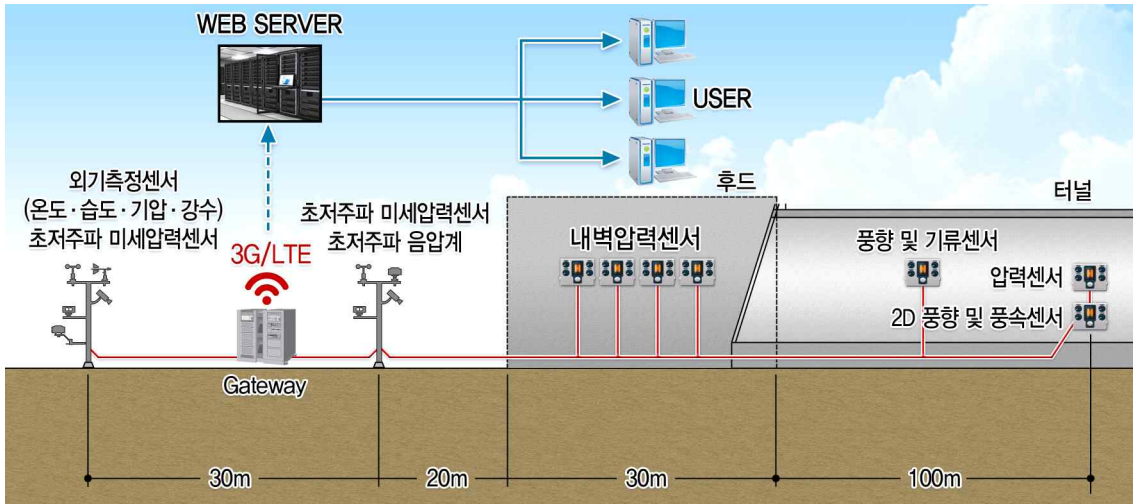


그림 4.2.2 후드가 설치되는 터널의 센서배치도

- TEST BED에 설치되는 센서의 요구사항은, 압력 및 소음, 기상현황을 계측하는 장비로 구분할 수 있다.
- 압력계측장비
  - 압력측정은 대기압과의 차이를 측정하는 상대압 측정과 진공상태의 압력에 대한 압력변위를 측정하는 절대압 측정장비가 있다.



(a) Setra 239 센서



(b) Endevco 8510B-1

#### 4.2.3 차압 센서



그림 4.2.4 절대압 센서

- 상대압 측정장비는 통상 차압(Pressure Difference)이라고 하는 개념을 설정하여 측정하는데, 레퍼런스 홀에 대기압 유지 챔버를 연결하여 사용한다. 이 챔버로부터 측정된 압력(대기압)과 측정대상지점의 압력을 비교하여 상대압력

을 나타낸다. 절대압 센서보다는 차압 센서가 초저주파 대역에서 주파수 특성이 평탄한 센서가 많아 차압센서를 권장한다. 고속열차 진입시 생성되는 터널 내 압력파의 압력변동도 저주파 특성이 강하다.

- 절대압 센서는 절대압 측정을 위해 내부에 진공공간을 두는 방식과 기계진동자의 고유진동수 변화로부터 압력을 측정하는 방식이 있다. 진공공간 측정방식은 진공공간의 경계부에 연질의 멤브레인을 설치하고 여기에 가해지는 압전저항을 측정하는 방식이며, 기계진동식은 쿼츠, 자석과 같은 기계의 진동을 측정하여 압력을 측정하는 방식이다. 이러한 방식은 대기압 측정을 위한 레퍼런스 챔버와 연결하는 튜브의 사용이 필요 없어 설치가 용이하지만 매우 낮은 저주파(초저주파)에서의 측정이 불가능한 센서 들이 다수이다.

○ 소음(음압)계측장비

- 소음(음압)측정은 일반적으로 인간의 가청주파수 대역인 1Hz에서 20,000Hz까지의 주파수변동값을 측정하는 장비를 사용한다. 그러나 터널 미기압파는 가청주파수 대역 이하의 압력성분을 가지고 있고, 이는 진동으로 인간에게 느껴지므로 상대적으로 낮은 대역의 주파수 측정이 가능한 장비가 필요하다.

표 4.2.4 일반음압계와 저주파 음압계의 특성 비교

항목	초저주파 음압계	일반 음압계
	0.2~1,000Hz	1~20kHz
주파수 밴드	3대역	8대역

- 음압계는 계측을 마이크로 폰(일종의 압력센서)으로 수행하여 Voltage 값을 음압 값으로 출력하는데, 미기압파의 측정 신뢰성 향상을 위해서는 초저주파 압력성분을 측정하는 장비가 요구된다. 이러한 계측장치는 공기중의 진동압력을 측정하는 것으로 저주파 상태에서의 미세압력측정을 위해 사용된다. 압력 측정범위는 0.2Hz에서 1,000Hz 정도이다.

○ 외부 기상상태 측정장비

- 터널 내외부는 일반적으로 개활지보다는 골짜기 지형에 위치하고 있는 경우가 많고, 국지적인 기상변화가 발생할 가능성이 높다. 일반적인 기상관측소는 장애물이 없는 개활지에 설치되고 바람의 영향을 적게 받는 지점에 설치한다. 이러한 지점에 설치된 기상관측장비에서 측정된 데이터는 지역의 대표성을 가

진다.

- 터널 출구에서 외부로 방사되는 미기압과 측정 시에는 터널 주변의 기상상황, 대기압력, 터널내 풍향풍속과 같은 국지기후 조건에 영향을 받기 때문에, 열차가 진입하는 터널 내부나 미기압파가 발생하는 터널 출구의 기후 상태가 중요하다. 이를 위하여 터널 갱구인근에 기상관측장치를 설치하여 대기의 온도, 습도, 압력, 강우여부 등을 파악하여야 한다. 여기에서 측정된 데이터는 터널내 압력상황 및 열차운행속도등과의 변수와의 상관관계를 조사하여야 하며, 동일 열차운행조건에서도 온습도에 대하여 미기압과 발생여부가 어떻게 변동되는지 명확하게 증명된 바가 없으므로 이에 대한 연구자료 확보를 위하여 필요하다.



그림 4.2.5 외부기상관측장치

#### ○ 모니터링 시스템

- 최근 들어 인터넷 네트워크를 기반으로한 유비쿼터스(Ubiquitous) 환경이 조성되면서 센서에 기반한 시설관리 및 변위 파악등이 활발하게 시행되고 있다. 기존에는 인력에 의하여 일상점검-정기점검 등의 과정으로 육안확인, 분해조립등의 과정을 거쳤다면, 이제는 센서에서 보내주는 신호를 감지하여 중앙에서 능동적 대응이 가능한 기술이 개발되어 활용되고 있는 추세이다.
- 터널분야에서도 기존에는 폐쇄시스템으로 구성된 자체적인 감시 및 관리시스템이 있었고, 이는 소수의 현장관리자만이 상황을 파악할 수 있는 문제점으로 인해 인재(人災)에 의한 사고가 빈번히 발생하고 원격지에서의 상황파악 및 대처가 곤란한 경우가 대부분이었다.
- 특히 터널 출구의 미기압파에 있어서는 현재까지 이러한 모니터링 시스템이

시도된 적이 없다. 미기압파의 특성이 현재까지 알려진 바에 따르면, 고속열차의 터널내 진입으로 인한 압축파로 인해 발생하는 것이기는 하나, 터널 내외부의 기상조건 및 온습도등에 영향을 받을 수 있고, 복선터널의 경우에는 터널내 열차교행 등에 따라 압력파의 중첩으로 변동될 수 있는 문제점을 가지고 있었다. 또한, 현장에서 계측을 시행하더라도 데이터를 회수하여 분석하기까지의 정보분석 주기가 길어 1회성 측정에 그치고 있는 것이 현실이다.

- 미기압파는 소음 및 진동 등의 환경피해를 발생시키는 원인이 될 수 있기 때문에 면밀한 관측과 이를 기반으로 빅데이터 분석이 필요하다. 이를 위해서는 현장에 설치된 센서에서 수집된 데이터를 중앙으로 전송하고 이를 분석하는 일련의 과정을 시스템화하여 적용할 필요가 있다.
- 센서 네트워크(Sensor Network)란 물리량을 계측하는 센서에서 수집된 정보를 집계하여 정보이용 요구자에게 전송하는 일련의 시스템으로 정의할 수 있다.

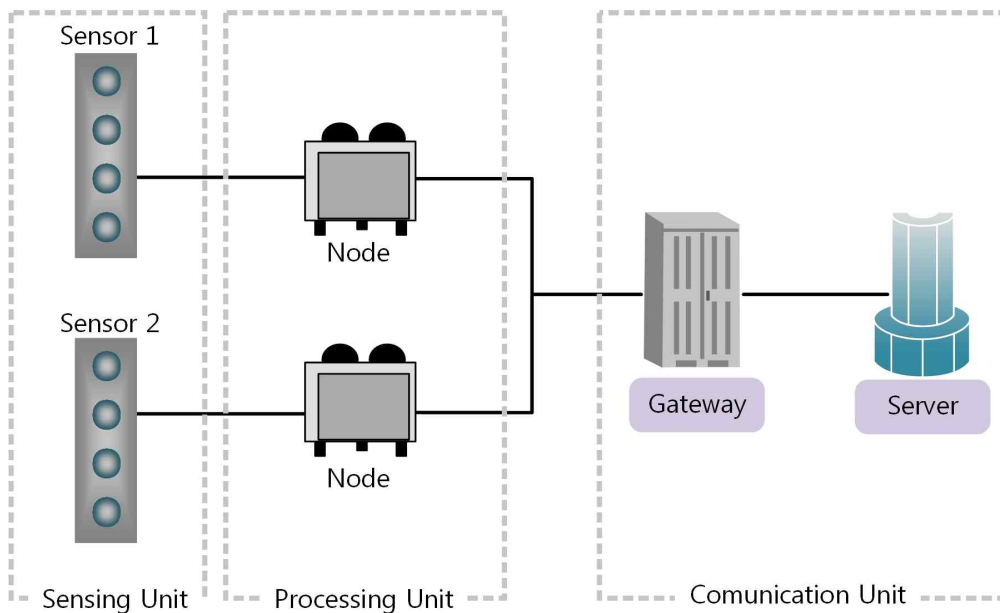


그림 4.2.6 센서 네트워크의 개념도

- 센서네트워크의 구성은 여러 부분으로 구성할 수 있는데, 우선 가장 말단의 정보수집용 센서가 있다. 현재의 물리량 계측 센서들은 대부분 말단 프로브(Probe)에 감지되는 전압을 기준으로 계측되는 경우가 많다. 전압이 계측되면 계측된 전압값을 그대로 전송할 수도 있지만 이 경우에는 전송케이블의 길이가 길어지는 경우에 전압강하로 인해 당초 측정된 값의 왜곡이 발생하는 경우가 있다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 변환기(Tranducer)를 통해 신호를 전송하는 형태가 대부분이다.
- 이렇게 전송되는 신호는 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환해주는 변환기

(A/D Converter)를 거치게 된다. 만약 많은 수의 센서가 산재하여 있고, ADC까지의 길이가 긴 경우에는 중간에 노드(Node)라는 개념의 기기를 배치하여 데이터를 모으고 이를 라우터(Router)로 집결시킨다. 여기까지는 데이터가 외부로 전송되지 않은 상태이며, 기기의 임시메모리에 저장되어 있는 상태이다.

- 이를 외부로 전송하기 위하여 통신 유니트가 필요하며, 게이트웨이(Gateway)를 통해 원거리에 있는 관리자에게 정보가 전달되는 형태이다.

#### ○ 제어프로그램의 구축 및 분석사양

- 모니터링 시스템은 터널의 상태 및 분석, 이에 따른 다양한 예측, 경보 전달체계 구성에 매우 중요한 요소이다. 모니터링 시스템이 갖추어야 할 기능은 각 센서 모듈에서 측정된 계측값을 데이터베이스에 저장하고, 저장된 계측값의 표출과 다양한 분석 및 가능성 판단, 관리기준정의, 최종 결과 상태판단, 경보 방법 선택 등이다.
- 모니터링 S/W는 웹기반으로 구성되어 인터넷을 통해 시간과 장소에 제약을 받지 않고, 언제 어디서나 접근이 가능하며, 사용자 편의성을 제공하기 위하여 GUI 환경으로 구성되어 있다. 데이터는 다양한 검색 기능으로 최적의 결과를 제공한다.



그림 4.2.7 웹기반 모니터링 시스템의 예

- 데이터베이스는 센서 모듈로부터 수신한 데이터를 일정시간 간격으로 계측값의 표출 및 분석 정보로 종류에 따라 다른 형태로 가공되어 기록된다. 데이터들은 모니터링 수행의 편의성을 제공하기 위하여 시간, 일, 월별 단위의 데이터로 기록된다.
- 이를 출력하기 위해 데이터베이스에 저장된 데이터는 다양한 그래프와 도표를

이용하여 시각화 되어지며, 다양한 검색 기능과 함께 제공되므로 현장의 상황을 실시간으로 파악할 수 있다.

- 계측된 데이터의 분석 작업은 데이터베이스에 저장된 데이터를 여러 가지 분석 기법 및 다양한 조건이 적용되어 가능성 판단, 관리기준정의, 최종 결과 상태판단을 위한 데이터로 재구성될 수 있다. 이렇게 재구성된 데이터는 위험판단 기준관리와 경보판단 기준관리를 위한 기본 데이터로 사용될 수 있다.
- 위험 판단 기준관리는 계측 값의 다양한 조건에 따라 정상, 주의, 심각, 경보 등 4가지의 동작기준으로 구성되며, 각 기준은 상황에 따라 정의가 수정될 수 있다. 이러한 동작기준에 따라 경보판단 기준관리는 적절한 알람 메시지를 전달한다. 알람 메시지는 SMS, 경보 등으로 구성할 수 있으며, 알람 메시지의 기준 및 적용은 상황에 따라 조정이 가능하다.
- 이러한 모니터링 시스템은 원격 제어가 가능해야 하며, 센서 모듈이 측정한 데이터뿐만 아니라 센서 모듈의 운용 시 발생하는 다양한 데이터 신호를 데이터베이스에 저장하여, 센서 모듈의 이상 유무를 검사하여 한다. 이상이 판단된 경우, 접근 권한을 가지고 있는 해당 권한자 등이 웹을 통해 센서 모듈에 접속하여 센서의 제어 및 관리가 가능하다.
- 데이터의 저장방법은 모니터링되는 터널의 개수 및 센싱 주기에 따라 산출되는 데이터의 양이 늘어나게 되므로 용량 증설이 용이한 데이터베이스 서버가 필요하다. 최근에는 클라우드 방식의 저장네트워크가 발전하고 있어 이러한 방식을 고려하여 백업의 안정성과 용량 증설의 용이성을 확보하는 것이 좋다.
- 저장된 데이터는 웹페이지를 통하여 관련자 누구나 열람이 가능하여야 하며, 간단한 분석이 가능하도록 분석도구가 제공되어야 한다. 또한 이상신호에 대한 필터링 및 알람기능을 장착하여 기준치 이상의 압력이 발생하거나, 소음문제가 발생하는 경우 운영 및 관리기관에서 즉각 감지가 가능하도록 모바일 알람체계 등을 갖추는 것이 필요하다.

#### (4) Test Bed 후보지 선정

- 250km/h급의 원주-강릉 일반철도가 2016년에 완공되고, 2017년부터 시운전시험을 시행할 예정이다.
- 2016년에 본 기획연구의 본과제가 시작하면, 2017년도인 2차년도에 원주-강릉 TEST-BED에서의 현장시험이 가능하다.



그림 4.2.8 원주-강릉 노선도

표 4.2.5 원주-강릉 터널 현황

분	공구	공구 연장	터널	터널 연장(m)	STA.
1	1	10.85km		675	2km030
2			만종	260	4km065
3			호저	1,275	7km660
4	2	11.57km	의관	900	15km460
5			청용	350	19km485
6			남산	1,580	20km690
7	3	10.98km	추동	440	23km580
8			비대	1,160	26km340
9			용둔	600	29km640
10	4	11.60km	하궁	6,240	35km500
11	5	9.69km	둔내	8,267.34	45km480
12			진조	650	55km165
13	6	8.80km	면온	662	57km920
14			유포	880	58km786
15			재산	2,100	60km035
16	7	9.42km	평창	8,718	63km*85
17			거문	550	72km670
18			상월	1,160	73km570
19	8	7.48km	송정	180	75km995
20			매산	610	76km330
21			면화	270	77km190
22			호명	210	77km820
23			웅장	500	79km370
24	9	12.70km	대관령	21,755	80km*50
25	10	9.40km	성산	1,485	102km330
26			칠봉 제1	110	104km400
27			칠봉 제2	1,780	106km480
28	11	17.72km	박월	400	110km340
29			청량	2,500	116km500

(5) Test Bed 기대성과 및 활용방안

- 미기압과 등의 문제가 철도터널의 공기역학적 문제에 해당하나, 최근 IT기술의 발달로 이종융합이 가능한 기술을 선보이고 있으며, 무선데이터 전송기술, 인터넷 소프트웨어, 빅데이터 분석기술등과의 조합으로 근본적인 공기역학적 문제를 해소할 수 있고 이용자, 관리자, 연구자간의 정보교류를 활성화 시킬 수 있을 것으로 예상된다.

5. 연차별 기술로드맵

일련 번호	연구내용	추진 일정 (년)		
		1차년	2차년	3차년
1	250km/h급 고효율 후드의 실용화를 위한 통합 설계 및 평가 기술개발	주관기관		
	국내외 현장시험 데이터의 분석으로 환경영향평가 경험식의 경험상수 평가	■		■
	초고속 터널주행 열차모델 시험장치에 1/60축척 실험상 터널 및 후드 설계/제작, 실용화 성능평가	■		
	초고속 터널주행 열차모델 시험장치에 의한 TEST-BED 사양의 1/60축척 사갱 및 기재갱의 실용화 성능평가	■		
	환경영향평가 경험식의 경험상수 평가에 대한 CFD 해석 검증	■		■
	차세대 고효율 후드의 경제성 평가에 의한 기술가치 평가	■		
	주변민가에 미치는 터널 미기압파 환경영향평가의 상용화 S/W 개발	■		■
	후드의 첨단소재 및 슬림화 구조 검토 및 적용성 평가	■	■	■
	주변 환경과 어울리는 후드 스타일링 산업디자인 수행	■		
	적용소재에 안정성과 신뢰성이 검증된 후드 1차 시작품 제작(1/10~1/70축척)		■	
	본선 시험부설 TEST-BED에서의 현장시험 및 평			

	가기술 개발(민가영향 포함)								
	1:1 실척 후드 시제품을 본선 시험부설 TEST-BED에 구축								
	본선 TEST-BED 시제품 현장시험의 장거리 모니터링시스템(성능평가) 구축, 모니터링 수행								
	250km/h급 운행에서 터널 미기압파 허용기준의 지원 및 개정(안)								
	본선 TEST-BED에서 시제품의 시험평가 모니터링 수행 및 시험결과 분석, 최종보고서 작성								
2	<b>250km/h급 고효율 후드의 공기역학적 성능평가 및 모니터링 기술개발</b>	<b>위탁기관 (1)</b>							
	3D CFD 해석에 의한 고효율 후드 구조체의 공기역학적 성능평가기법 개발								
	본선 TEST-BED에서의 다목적 시험용 후드의 통풍관 개구부의 면적 원격제어 및 계측 인터페이스 설계 연구								
	본선 TEST-BED에서의 계측지그, 시그널 케이블링 배치, 콘트롤 박스 구성 및 인터페이스 설계(주관 기관 중앙모니터링-빅데이터의 LTE급 무선전송 시스템)								
	본선 TEST-BED에의 다목적 시험용 후드의 주관 기관 중앙 모니터링 S/W 작성 및 구축, 빅데이터 분석/처리								
	본선 Test-Bed 노선 터널들의 사양, 사갱, 기재갱, 터널 주변 민가 및 이격거리 도면화, 데이터 베이스화								
	본선 Test-Bed의 다목적 시험용 후드의 현장시험 데이터와 3D CFD 해석결과 비교/평가								
3	<b>국내 고속열차 차량 특성과 철도터널 주변 환경에 대한 미기압파 민감도 연구</b>	<b>위탁기관 (2)</b>							
	TEST-BED 노선의 터널 출구갱문 형상에 따른 미기압파 3차원 방사패턴 분석연구								
	TEST-BED 노선의 터널 출구외부 지형환경에 따른 미기압파 3차원 방사패턴 연구								

	국내 콘크리트 궤도 터널의 터널내 상세사양에 대한 방사 미기압파의 주파수 특성 연구								
	250km/h급 국내외 고속열차와 터널 사양에 대한 방사 미기압파 크기의 비교 연구								
	미기압파의 크기 및 FFT 분석에 따른 국내 민가특성에 미치는 영향 평가								
4	<b>250km/h급 고효율 후드의 실용화 구조안정성 및 시공성 향상 기술개발</b>	<b>위탁기관 (3)</b>							
	운영 중인 철도노선에서의 터널입구 후드의 저비용 설치 소재/시공법 개발								
	터널입구 후드의 교량설치 구조설계/시공 향상기술 개발								
	후드의 첨단소재 검토 및 슬림화 구조 후드의 공진방지 및 내진성능 해석평가 및 시험평가 모니터링, 시험결과 분석								
	본선 TEST-BED에 구조안정성 및 시공성 향상 기술 적용								
	본선 TEST-BED 현장시험의 다목적 시험용 후드의 실시 설계도면 작성								
	250km/h급 실용화를 위한 최적설계의 고효율 후드의 실시설계 도면 작성								
	콘크리트 후드와 강구조 후드 등에 대한 안전기준 및 지침 마련								

## 6. 성과의 활용방안

구분	최종 성과물	활용방안
총괄	준고속철도용 터널 미기압파 저감 대책 실용화 기술개발	
주관기관	250km/h급 고효율 후드의 실용화를 위한 통합설계 및 평가 기술개발	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>초고속 터널주행 열차모델 시험장치에 1/60축척 실험상 터널 및 후드 설계/제작물</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>차세대 고효율 후드 최적 설계 실험에 활용</li> <li>차세대 고효율 후드의 실</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>주변 환경과 어울리는 후드 스타일링 산업디자인 결과물</li> <li>250km/h급 실용화를 위한 최적시험설계의 고효율 후드 실시설계도면</li> <li>주변민가에 미치는 터널 미기압파 환경영향평가의 상용화 S/W</li> <li>차세대 고효율 후드의 경제성 평가에 의한 기술가치 평가</li> <li>적용소재에 안정성과 신뢰성이 검증된 후드 시제품</li> <li>본선 시험부설 TEST-BED에서의 현장 시험 및 평가기술</li> <li>후드 시제품을 본선 시험부설 TEST-BED에 구축</li> <li>250km/h급 운행에서 터널 미기압파 허용기준의 지원 및 개정(안)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>용화 시 주변환경과 어울리는 형상디자인에 활용</li> <li>차세대 고효율 후드 실용화에 반영</li> <li>각종 신규철도의 터널 미기압파 환경영향평가에 활용</li> <li>기술이전에 활용</li> <li>공용중 설치 가능한 후드에 활용</li> <li>TEST-BED 현장시험에 활용</li> <li>국내 실정에 맞는 미기압파 허용기준치 개정안 도출</li> </ul>
위탁기관 (1)	<b>250km/h급 고효율 후드의 공기역학적 성능평가 및 모니터링 기술개발</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>3D CFD 해석에 의한 고효율 후드 구조체의 공기역학적 성능평가기법 보고서</li> <li>본선 TEST-BED 시제품의 장거리 모니터링시스템(성능평가) 설계 및 데이터 무선 전송 시스템 설계도 및 사양서</li> <li>본선 TEST-BED의 중앙모니터링을 위한 소프트웨어 및 Web Page</li> <li>본선 TEST-BED노선 터널 사양, 구조물, 터널주변 보안물건에 대한 도면화 및 데이터베이스</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>터널미기압파 상용화 S/W 개발반영</li> <li>TEST-BED 구축 적용</li> <li>TEST-BED의 시험데이터 모니터링</li> <li>국내실정의 환경영향평가 및 기준개정에 활용</li> </ul>
위탁기관 (2)	<b>국내 고속열차 차량 특성과 철도터널 주변 환경에 대한 미기압파 민감도 연구</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>국내 운행 고속열차와 철도터널 내부 및 터널 외부 지형환경에 대한 터널 미기압파 특성에 대한 보고서</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>국내 실정에 맞는 터널 미기압파 환경영향 평가 및 대책마련에 활용</li> </ul>
위탁기관 (3)	<b>250km/h급 고효율 후드의 실용화 구조안정성 및 공용중 시공성 향상 기술개발</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>운행 중인 철도노선에서의 터널입구 후드의 저비용 설치 소재/시공법</li> <li>터널입구 후드의 교량설치 구조설계/시공 향상기술</li> <li>침단소재/슬림화 구조 후드의 공진방지 및 내진성능 평가기술</li> <li>250km/h급 실용화를 위한 고효율 후드 실시설계도면</li> <li>콘크리트 후드와 강구조 후드 등에 대한 안전기준 및 지침</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>TEST-BED구축에 반영</li> <li>TEST-BED구축에 반영</li> <li>후드 시제품 설계 적용</li> <li>TEST-BED시제품 제작 및 기술보급에 활용</li> <li>후드 시제품 설계 적용</li> </ul>

## 7. 연구수행체계 제안

- 국토해양부
  - 사업총괄기관으로서 연구사업 기획·관리·감독을 총괄하고 기술개발 촉진 및 성과 보급을 위한 법·제도 개선 업무 지원
- 전문기관(한국건설교통기술기획평가원)
  - 사업관리 전문기관으로서 연구사업 기획·평가·관리 등의 업무를 수행하고, 연구단 기획, 진도점검, 단계(중간)평가, 기술확산 등을 중점 관리
- 추진체계도
  - 이상의 준고속철도용 터널 미기압과 저감 대책 실용화 기술개발사업의 추진체계를 도식화하면 다음 그림과 같음



그림 4.2.9 준고속철도용 터널 미기압과 저감 대책 실용화 기술개발사업 추진체계

### 3절 소요예산 산정

표 5.1.1 연구과제별 소요예산(단위: 억원)

분야	세부분야	연구과제 및 연구내용	1차년		2차년		3차년		합계	
			정부	민간	정부	민간	정부	민간	정부	민간
종ial			16.8		23.2		9		49	
관련기관		<b>1. 250km/h급 고속철도 주도의 실용화를 위한 플랫폼 및 평가 기술개발</b>	12.2		16.1		6.8		35.1	
	1	국내외 현장시험 데이터의 분석으로 플랫폼평가가 결합식의 결합상수 평가	0.6		0.3		0.4		1.3	
	2	고속철도 플랫폼 달차로물 시험장치에 1/60회전 플랫폼 타널 및 구조 설계/제작-실용화 성능평가	2.4		0.4				2.8	
	3	고속철도 플랫폼 달차로물 시험장치에 의한 TEST-BED 사상의 1/60회전 사각 및 기차결합의 실용화 성능평가	1.5		0.5				2	
	4	플랫폼평가가 결합식의 결합상수 평가에 대한 CFD해석 검증	0.4				0.5		0.9	
	5	후면민가에 미치는 타널 미기압과 플랫폼평가가의 상응한 8/W 개발	0.7				0.5		1.2	
	6	구조의 절단수개 및 송림판 구조 검토 및 검증성 평가	0.3		0.5		0.4		1.2	
	7	후면 평결과 어울리는 구조 스타일링 산출디자인 수립	0.5						0.5	
	8	정음소자에 안정성과 신뢰성이 검증된 구조 1차 시제품 제작(1/10회전~1/70회전)	0.7						0.7	
	9	본선 시험부설 TEST-BED에서의 현장시험 및 평가기술 개발			4.7		0.9		5.6	
	10	1:1 실적 구조 시제품용 본선 TEST-BED에 구축(다목적 시험용 구조)			7.2				7.2	
	11	본선 TEST-BED 시제품 현장시험의 잡거리 모니터링시스템(성능평가) 구축			5		1.7		6.7	
	12	250km/h급 운영에서 타널 미기압과 허용기준의 지정 및 개입(안)			0.1		0.5		0.7	
13	본선 TEST-BED에서 시제품의 시험평가 모니터링 수립 및 시험결과 분석, 최종보고서 작성			0.7		3.6		4.3		
위탁기관-1		<b>2. 250km/h급 고속철도 주도의 공기역학적 성능평가 및 모니터링 기술개발</b>	2.7		4		1.2		7.9	
	1	3D CFD 해석에 의한 고속철도 구조체의 공기역학적 성능평가기술 개발	0.6		0.2		0.4		1.2	
	2	본선 TEST-BED에서의 다목적 시험용 구조의 동등한 개구부의 면적 용적비 및 계곡 인테페이스 설계 연구	0.3		1.2				1.5	
	3	본선 TEST-BED에서의 계곡지그, 시그널 케 이팅팅 배치, 콘드롬 박스 구성 및 인테페이스 설계(후관기관 용량모니터링-본데이터의 LTE를 구성전송 시스템)	0.5		1.1				1.6	
	4	본선 TEST-BED의 다목적 시험용 구조의 후관기관 용량 모니터링 8/W 작성 및 구축, 본데이터 분석/처리	0.9		1.4		0.8		3.1	
5	본선 TEST-BED본선 타널용의 사각, 사각, 기차결합, 타널 후면 민가 및 이격거리 도면화, 데이터 베이스화	0.4		0.1				0.5		
위탁기관-2		<b>3. 국내 고속철도 차량 동성과 열도터널 주변 환경에 대한 미기압과 민감도 연구</b>	0.7		0.7		0.4		1.8	
	1	TEST-BED 노선의 타널 용구결합 형상에 따른 미기압과 3차원 방사파형 분석연구	0.4						0.4	
	2	TEST-BED 노선의 타널 용구외부 지형환경에 따른 미기압과 3차원 방사파형 연구	0.3						0.3	
	3	국내 본리프 구조 타널의 타널내 살세사상에 대한 방사 미기압과 후파수 측정연구			0.5				0.5	
	4	250km/h급 국내외 고속철도와 타널 사상에 대한 방사 미기압과 크기의 비교 연구			0.2				0.2	
5	미기압과의 크기 및 CFD 분석에 따른 국내 민감도에 미치는 영향 평가					0.4		0.4		
위탁기관-3		<b>4. 250km/h급 고속철도 주도의 실용화 구조안정성 및 공역용 시공성 향상 기술개발</b>	1.2		2.4		0.6		4.2	
	1	중립 용인 절단노선에서의 타널입구 구조의 저비용 설계/시공법 개발	0.2		0.4		0.1		0.7	
	2	타널입구 구조의 코팅설치 구조설계/시공 향상기술 개발	0.1		0.3		0.1		0.5	
	3	구조의 절단수개 검토 및 송림판 구조 구조의 송진방지 및 내진성을 해석평가 및 시험평가 모니터링, 시험결과 분석	0.1		0.3		0.1		0.5	
	4	본선 TEST-BED 현장시험의 다목적 시험용 구조의 실사 설계도면 작성	0.4		0.5				0.9	
	5	본선 TEST-BED에 구조안정성 및 시공성 향상 기술 적용	0.2		0.6				0.8	
	6	250km/h급 실용화를 위한 최종설계의 고속철도 구조의 실사설계 도면 작성/제출					0.3		0.3	
7	본리프 구조와 강구조 구조 등에 대한 안전기준 및 지원 마련	0.2		0.3				0.5		

예상세부과제	소요예산(안) (단위 : 억원)
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 250km/h급 고효율 후드의 실용화를 위한 통합설계 및 평가 기술개발 <ul style="list-style-type: none"> <li>· 국내외 현장시험 데이터의 분석으로 환경영향평가 경험식의 경험상수 평가</li> <li>· 초고속 터널주행 열차모델 시험장치에 1/60축척 실험상 터널 및 후드 설계/제작, 실용화 성능평가</li> <li>· 초고속 터널주행 열차모델 시험장치에 의한 TEST-BED 사양의 1/60축척 사갱 및 기재갱의 실용화 성능평가</li> <li>· 주변민가에 미치는 터널 미기압파 환경영향평가의 상용화 S/W 개발</li> <li>· 차세대 고효율 후드의 경제성 평가에 의한 기술가치 평가</li> <li>· 후드의 첨단소재 및 슬림화 구조 검토 및 적용성 평가</li> <li>· 주변 환경과 어울리는 후드 스타일링 산업디자인 수행</li> <li>· 적용소재에 안정성과 신뢰성이 검증된 후드 1차 시제품 제작(1/10축척~1/70축척)</li> <li>· 본선 TEST-BED 시제품 현장시험의 장거리 모니터링시스템(성능평가) 구축</li> <li>· 250km/h급 운행에서 터널 미기압파 허용기준의 지원 및 개정(안)</li> <li>· 본선 TEST-BED에서 시제품의 시험평가 모니터링 수행 및 시험결과 분석</li> </ul> </li> </ul>	<p style="text-align: center;">35.1억 (TEST-BED 시제품 제작, 시험부설, 현장계측 및 모니터링 장비비용의 13.2억 포함)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 250km/h급 고효율 후드의 공기역학적 성능평가 및 모니터링 기술개발 <ul style="list-style-type: none"> <li>· 3D CFD 해석에 의한 고효율 후드 구조체의 공기역학적 성능평가기법 개발</li> <li>· 본선 TEST-BED에서의 다목적 시험용 후드의 통풍관 개구부의 면적 원격제어 및 계측 인터페이스 설계 연구</li> <li>· 본선 TEST-BED에서의 계측지그, 시그널 케이블링 배치, 콘트롤 박스 구성 및 인터페이스 설계(주관기관 중앙모니터링-빅데이터의 LTE급 무선전송 시스템)</li> <li>· 본선 TEST-BED에의 다목적 시험용 후드의 주관기관 중앙 모니터링 S/W 작성 및 구축, 빅데이터 분석/처리</li> <li>· 본선 Test-Bed 노선 터널들의 사양, 사갱, 기재갱, 터널 주변 민가 및 이격거리 도면화, 데이터 베이스화</li> </ul> </li> </ul>	<p style="text-align: center;">7.9억</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 국내 고속열차 차량 특성과 철도터널 주변 환경에 대한 미기압파 민감도 연구 <ul style="list-style-type: none"> <li>· TEST-BED 노선의 터널 출구광문 형상에 따른 미기압파 3차원 방사패턴 분석연구</li> <li>· TEST-BED 노선의 터널 출구외부 지형환경에 따른 미기압파 3차원 방사패턴 연구</li> <li>· 국내 콘크리트 궤도 터널의 터널내 상세사양에 대한 방사 미기압파의 주파수 특성 연구</li> <li>· 250km/h급 국내외 고속열차와 터널 사양에 대한 방사 미기압파 크기의 비교 연구</li> <li>· 미기압파의 크기 및 FFT 분석에 따른 국내 민가분포 특성에 미치는 영향 평가</li> </ul> </li> </ul>	<p style="text-align: center;">1.8억</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 250km/h급 고효율 후드의 실용화 구조안정성 및 공용중 시공성 향상 기술개발 <ul style="list-style-type: none"> <li>· 운행 중인 철도노선에서의 터널입구 후드의 저비용 설치 소재/시공법 개발</li> <li>· 터널입구 후드의 교량설치 구조설계/시공 향상기술 개발</li> <li>· 후드의 첨단소재 검토 및 슬림화 구조 후드의 공진방지 및 내진성능 해석평가 및 시험평가 모니터링, 시험결과 분석</li> <li>· 본선 TEST-BED에서의 구조안정성 및 시공성 향상 기술 연구</li> <li>· 본선 TEST-BED 현장시험의 다목적 시험용 후드의 실시 설계도면 작성</li> <li>· 250km/h급 실용화를 위한 최적설계의 고효율 후드의 실시설계 도면 작성</li> <li>· 콘크리트 후드와 강구조 후드 등에 대한 안전기준 및 지침 마련</li> </ul> </li> </ul>	<p style="text-align: center;">4.2억</p>

표 5.1.2 연구과제별 소요예산 총괄표(단위: 억원)

준고속철도용 터널 미기압파 저감 대책 실용화 기술개발	1차년		2차년		3차년		합계	
	정부	민간	정부	민간	정부	민간	정부	민간
총괄	16.8		23.2		9		49	
주관기관	12.2		16.1		6.8		35.1	
위탁기관 1	2.7		4		1.2		7.9	
위탁기관 2	0.7		0.7		0.4		1.8	
위탁기관 3	1.2		2.4		0.6		4.2	

#### 4절 기존연구와의 중복성 검토 및 연계방안

번	선행과제명 (연구연도)	연구자	연구목적	연구방법	주요 연구내용	선행과제와의 차별성		
						연구목적	연구방법	연구내용
1	터널 미기압 파 저감대책 최적화 기술 개발 (2012~2013)	김동현	“상부 통풍관형 후드”의 최적화 기술 개발로서 420km/h급 고속철도에서 단선/복선 터널형식별, 터널연장별로 최적성능의 후드사양 개발	 <p>열차모델 터널 주행시험기 연구수행 &lt;현장적용&gt;</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>열차진입 시 상부면 활용하여 압력구배 저감함.</li> <li>420km/h급 호남고속철도 테스트-베드 우산터널에 시범설치 및 기술이전 완료함</li> <li>1999년도에 원천기술이 개발된 기존의 “상부 통풍관형 후드”는 국내특허만 출원/등록하여 해외수출 불가능</li> </ul>	본 연구과제는 2014년 12월에 종료되는 “고성능 차세대 터널 미기압파 저감대책 원천기술 개발” 과제에서 원천기술 연구결과물인 “열차진행방향에 평행한 덕트를 포함하는 후드”, “아치형 슬릿 후드”, “날개형 후드”의 실용화 기술개발로 “상부 통풍관형 후드” 선행과제 기술과는 차별화됨	본 연구과제는 2014년 12월에 종료되는 “고성능 차세대 터널 미기압파 저감대책 원천기술 개발” 연구를 바탕으로 원천기술의 응용과 파일럿 플랜트(현장실험용 후드 시공설치) 제작/적용을 통해 개발장치의 검증 및 신뢰성 확보	기존과제는 “상부 통풍관형 후드”에 대한 축소모델 주행 실험을 수행하였으나, 본 과제에서는 2014년도에 개발한 신규 고성능 차세대 터널 미기압파 저감대책 원천기술의 실용화를 위해 다양한 실제상황에 대한 적용성 검토와 파일럿 플랜트 적용을 통해 개발장치의 검증 및 신뢰성을 확보하여 실제 적용 가능한 기술을 개발함.
2	고성능 차세대 터널 미기압파 저감대책 원천기술 개발 (2014)	김동현	고성능의 터널 미기압파 저감대책 기술개발을 목표로 “열차진행방향에 평행한 덕트를 포함하는 후드”, “아치형 슬릿 후드”, “날개형 후드” 등을 개발하여, 수출이 가능한 차세대 원천기술개발	 <p>열차모델 터널 주행시험 및 이론적 연구를 수행</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>열차진입 방향과 평행하게 공기압력 경감시켜, 후드단면의 경감성능은 상대적으로 더 큼.</li> <li>고성능의 차별화된 후드 3가지를 신규 개발함</li> <li>원천기술의 고성능 차세대 터널 미기압파 저감대책 기술개발로서 국제특허 출원하여 해외 수출 가능</li> </ul>	본 연구과제는 2014년 12월에 종료되는 “고성능 차세대 터널 미기압파 저감대책 원천기술 개발” 과제에서 원천기술 연구결과물인 “열차진행방향에 평행한 덕트를 포함하는 후드”, “아치형 슬릿 후드”, “날개형 후드”의 실용화 기술개발임	기존의 철도연 주요사업(2014 완료)의 1단계 원천기술 개발 연구를 바탕으로 원천기술의 응용과 파일럿 플랜트(현장에 실험용 후드 시공설치) 제작/적용을 통해 개발장치의 검증 및 신뢰성 확보	기존과제는 축소모델 주행 실험 및 이론적 연구를 수행하였으나, 본 과제에서는 실용화를 위해 다양한 실제상황에 대한 적용성 검토와 파일럿 플랜트(현장에 실험용 후드 시공설치) 적용을 통해 개발장치의 검증 및 신뢰성을 확보하여 실제 적용 가능한 기술을 개발함. • 선진국의 기존기술 대비 성능 20% 향상, 건설비의 10% 절감을 목표로 함

○ 400km/h급 TEST-BED 호남고속철도에 통풍관형 후드가 적용된 사례가 있으므로 속도대역 별로 다른 형태의 후드개발이 필요한 사유

- 공기역학적인 설명으로는, 터널로의 열차진입속도에 따라 압축시간과 압축거리, 압축파의 크기가 달라지기 때문에 터널 입구 후드의 단면적, 후드의 상부 통풍관 크기와 위치, 높이가 다르게끔 설계되어야 함(열차모델 터널주행시험기로 최적사양을 찾아 설계함).
- 호남고속철도 400km/h 증속구간 Test-bed의 우산터널(연장 300m) 종점에 “2홀 상부통풍관형 후드”를 시범설치하고 현재 시운전시험 중에 있음. 이 후드는 고속열차의 터널진입속도 300km/h ~ 420km/h 범위에 대하여 최적설계 실험을 수행하였는데, 호남고속철도 터널단면적 96.7m<sup>2</sup>에 대하여 특히 350km/h ~ 420km/h에 대하여 최고성능이 나오도록 후드가 설계되었음(사유는 호남고속철도 사양에서 터널 미기압과가 350km/h 이상에서 발생하는 것으로 환경영향평가 되었음). 또한, 호남고속철도 터널사양에 대한 특정한 터널단면적/열차단면적 비율에 대하여 최적화되었음.
- 그동안 원천기술 개발을 통하여 확인한 사항은 400km/h급 후드의 개발 사양(공기역학적 제원 치수)을 그대로 250km/h급 터널(복선 터널단면적 66m<sup>2</sup>, 단선터널단면적 40m<sup>2</sup>)에 상사시켜 적용하면 터널 미기압과 저감성능이 매우 낮게 도출되었음. 즉, 상사성이 성립하지 않음.
- 통풍관형 후드는 여러 속도 대역과 여러 터널 단면적에서 열차모델 주행시험기로 최적설계(성능평가)를 수행해 본 결과 터널 미기압과 저감율이 최대 55%를 넘지 못함(연장 30m 이하의 표준형 크기 후드 비교).
- 터널 미기압과 폭발음은 200km/h 운행에서 터널단면적 63.4m<sup>2</sup>에서 크게 발생한 일본 신칸센의 사례(1975년)에서도 알 수 있듯이, 중앙선, 동해선, 중부이륙철도 등의 터널단면적(운행속도 200km/h급과 250km/h급의 단선터널단면적 40m<sup>2</sup>)에서 는 주변 민가의 창문이 파손될 정도의 큰 폭발음 발생이 확실시됨.
- 고속철도에서 세계 최대 터널단면적을 유지하다가, 세계 최소 터널단면적(운행속도 200km/h급과 250km/h급, 단선터널단면적 40m<sup>2</sup>)을 적용하기 시작한 우리나라 현실에서 고성능의 터널 미기압과 저감 후드기술이 절실히 필요함.
- 고성능 후드로는 28m길이의 후드를 설치하면 되는데 통풍관형 후드로는 60m급을 설치하면 시공비 증가, 주변 시설물과의 간섭 등이 발생함. 특히, 터널갱구 앞이 바로 교량인 경우가 많음.
- 또한 독자기술의 고성능 미기압과 저감 후드기술을 보유하고 있으면 고속철도 관련 토목 엔지니어링 기술을 해외 수출 시에 기술입찰에서 우위적 위치에 있게 됨.

○ 본 기획연구에서 검토 중인 날개형, 처마형 후드와 수직 통풍관형 후드와 비교하여 기술적·경제성 측면에서 비교

- 후드 길이 30m이하 표준형 크기에서 비교해 보았을 때, 수직 통풍관형 후드는 미기압과 저감율이 최대 55%정도이나 날개형 후드는 미기압과 저감율이 최대 70%정도로 약 15% 성능이 앞섬.

- 후드의 성능이 높으면 후드 설치 길이(연장)가 짧아지기 때문에 터널갱구 앞의 교량인 경우에 설치가 간편해 집니다. 또한 장대터널인 경우는 터널 갱구 앞의 구난 지역과의 접근성이 좋아짐. 후드 길이가 짧아지면 주변 시설물과의 간섭이 적어짐.
- 수직 통풍관형 후드는 겨울철에 상부 통풍관을 통하여 눈이 들어오고, 고드름이 통풍관을 통하여 형성될 수 있는데 날개형 후드는 이러한 문제가 없음. 또한 날개형 후드는 전차선지지 브라켓 설치가 용이함.
- 시공성 문제에 있어서, 상부 통풍관형 후드는 아치형 구조에서 상부 통풍관을 고려해야 하기 때문에 구조적 안정성 설계 및 시공에 애로사항이 있음. 그러나 날개형 후드 등은 상부구조가 간단하여 설계 및 시공이 용이함.
- 경제적 측면에서는, 터널 미기압과 저감 후드를 미기압과 저감성능 60%에서 70%로 증가시키려면 후드 길이가 200% 정도로 더 길어져야 하기 때문에 날개형 후드 등이 수직 통풍관형 후드보다 설치비가 50% 정도 더 저렴함(미기압과 저감 후드는 28m 내외 길이까지 저감성능이 선형적으로 증가하다가 더 길어지면 매우 둔하게 증가하다 정체됨).

○ 300km/h로 고속열차가 운영중인 경부고속철도에 대한 터널 미기압과로 인한 문제점 검토

- 300km/h 운행의 경부고속철도는 터널 내공단면적이 107m<sup>2</sup>로서, 300km/h 운행에 대하여 최적 설계된 대만고속철도 터널단면적(90m<sup>2</sup>)보다 17m<sup>2</sup>가 더 크게 설계되어 있음. 터널 미기압과가 발생되지 않을 정도로 터널 단면적을 크게 설계하였음. 2002년~2005년의 실제 경부고속철도 장대터널에 대하여 현장 계측시험을 수행한 결과에서도 10Pa 이하의 매우 작은 미기압과 강도를 나타냄(일본의 신칸센 허용기준은 50Pa 이하).
- 경부고속철도는 터널 진입속도 420km/h이상에서 터널 미기압과가 크게 발생될 것으로 예상됨(터널 연장에 따라 달라짐)
- 대만고속철도처럼 터널 단면적을 작게 설계하면 터널 건설비가 절감됨[터널단면적 20% 저감시키면 터널 건설비 10%~15% 절감됨(지하 압질에 따라 건설비 절감액 달라짐)]
- 경부고속철도 건설의 기본설계 당시에 터널 미기압과 저감 기술을 국내에서 확보하고 있었으면, 경부고속철도 터널 단면적을 90m<sup>2</sup>로 설계 했을 것이고, 경부고속철도 전체노선(총연장 423.8km)에서 터널이 차지하는 비율이 46%(195km)이므로 터널 단면적 16%를 줄일 수 있으므로 터널 건설비는 약 8% 절감할 수 있음. 경부고속철도의 대단면 터널에 대하여 km당 터널 건설비를 250억원/km으로 잡으면 3,480억원의 건설비가 절감됨(경부고속철도 건설은 1992년에 시작됨. 철도연 설립은 1996년).
  - ✓ 경부고속철도 전체 터널 54개소 중에 30개 터널 입/출구에 후드 설치하면 60개소에 후드설치: 60개소 x 7억원 = 420억원(후드 공사비용)
  - ✓ 상기 터널 건설비 절감액 3,480억원은 후드 공사비를 반영한 금액임.

## 5절 기대효과

### 1. 기획 연구결과의 활용방안

- 고효율의 한국형 미기압과 저감 후드 실용화 기술 RFP 제시를 통한 향후 과제 공모에 활용
- 연구개발 사전타당성 조사를 통한 R&D 기획, 예산확보, 추진 등에 활용

### 2. 기대성과

#### 가. 기술적 기대성과

- 터널 입·출구 민가의 충격성 소음/진동 환경문제에 대한 민원대책 확보 실용화 연구기획
- 국내/외 최고성능의 터널 미기압과 저감대책 후드 엔지니어링 기술 수출을 위한 실용화 기술 개발 기획
- 작은 터널내공단면적과 콘크리트 슬라브 궤도에서 고속철도의 속도향상에 가장 큰 장애요인 중에 하나인 터널 미기압과에 대한 실용화 대책기술 확보 연구기획
- 철도터널 건설비 저감에 대응하는 한국형 터널 미기압과 저감 후드 실용화의 실질적 기술대안 제시

#### 나. 사회 경제적 파급효과

- 터널 미기압과 저감대책 적용으로 터널내공단면적을 작게 할 수 있으므로 철도터널 건설비 절감됨
  - ☞ 터널 내공단면적 20%이상 축소효과 → 터널 건설비 15% 절감
- 현재 설계중인 중앙선, 중부내륙철도, 동해선 철도건설과 건설중인 원주-강릉 신선 등의 터널 미기압과 충격성 소음/진동 환경문제 해결(100개소 이상)
- 고효율의 원천기술의 터널 미기압과 저감대책 후드 실용화 기술개발 사업의 최적의 예산 및 자원 분배를 통해 R&D 예산절감

# 5장 과제 제안요구서

## 1절 과제 제안요구서(RFP)

### 1. 총괄(주관기관) 제안요구서(RFP)

과제명	준고속철도용 터널 미기압파 저감 대책 실용화 기술개발
1. 연구개발 목표	<p>최근 국내 철도터널설계는 터널 내공 단면적을 축소하여 터널 건설비를 크게 절감하는 추세이며, 유지관리 효율성 등을 감안하여 콘크리트궤도 공법을 적용하고 있으며 열차의 고속화 추세임. 이때 나타나는 문제점인 터널 미기압파 환경 소음·진동 문제를 저렴한 대책으로 실용화하는 핵심기술개발</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 다양한 연장의 소단면 터널들의 고속철도 Test-bed 구성을 통한 터널 미기압파 상시 모니터링시스템 구축 및 실선로 시험평가, DB 뱅크 구축</li> <li>• 공용중 시공성을 고려한 구조 및 소재의 터널 미기압파 후드 핵심성능평가 및 시제품 개발</li> <li>• 세계 최고성능의 기존대비 20% 향상된 터널 미기압파 저감 후드 실용화 기술개발</li> </ul>
2. 연구개발 필요성 및 기술동향	
<p>■ 연구개발의 필요성</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 고속열차가 터널에 진입할 때 압력파가 생성되어 터널의 끝을 향하여 음속으로 전파된다. 이러한 압력파의 일부분은 충격성 소음/진동의 형태로 터널 출구로부터 외부로 방사되는데 이를 미기압파(micro-pressure wave)라고 부르며, 터널 근처의 민가에서는 폭발음의 환경소음과 함께 심한 저주파 진동을 느끼게 됨.</li> <li>○ 경부/호남 고속철도는 터널 진입속도 대비 터널 내공단면적이 매우 크기 때문에 “터널 미기압파”라는 폭발음 발생이 없으나,</li> <li>○ 최근 국·내외 터널 설계는 사업비 축소, 유지관리 효율성 등을 감안 콘크리트궤도 공법을 적용, 단면축소와 고속화 추세로 터널 미기압파 대책마련 시급</li> <li>○ 일본, 독일, 중국 등 고속열차 운영국 들은 ‘08년 이후부터 미기압파 허용기준을 마련 건설단계부터 저감시설을 설계에 반영</li> <li>○ “터널입구 미기압파 저감 후드”는 최소 터널단면적과 콘크리트궤도를 제일 먼저 적용한 일본 신칸센 철도에서 1975년 이후에 지속적으로 연구 개발하여, 현재 독일, 프랑스 등의 유럽과 중국 등은 일본에서 개발한 “창문형 후드”를 사용하고 있음. 일본</li> </ul>

	<p>의 미기압파 저감 후드는 35년 동안의 연구개발 및 개량으로 지적 재산권 상에서 그동안 독점적 지위에 있었음.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 운행속도 200km/h 이상의 고속철도에서 터널 미기압파 저감 후드 대책은 시공비가 저렴하며, 궁극적으로 최적설계의 터널 단면적에서 적용되기 때문에 최선의 터널 건설비 절감 방법임.</li> <li>○ 국내에 터널출구 미기압파 허용기준(규제치)이 없어 신뢰성 있는 환경영향평가 수행 곤란 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 현재 설계중인 100개소 이상의 터널이 콘크리트 궤도 및 최소 내공 단면적으로 계획되어 있어 미기압파에 따른 민원급증 예상</li> </ul> </li> <li>○ 철도건설이 완공된 후에 저감대책을 적용할 경우 열차운행 안전성, 지장물 이설, 매몰비용 추가, 산악지형 조건 등으로 공사비 5~6배 증가</li> </ul>																				
<p>■ 기술동향</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 일본은 1975년 이후 신칸센에 콘크리트궤도를 적용하기 시작하면서 터널출구에서 미기압파의 폭발음 발생으로, 현재 500여개소 이상에 터널 미기압파 저감 후드가 설치되어 있음.</li> <li>○ 중국은 200km/h급 신선과 300km/h급 신선에 터널 미기압파 저감 후드를 광범위하게 적용하고 있음.</li> <li>○ 프랑스는 국토의 대부분이 평야지대이지만 국경근처의 산악지대 철도터널에는 터널 내공단면적 최적화와 더불어, 터널출구 미기압파를 저감시키기 위하여 터널입구 후드를 적용하고 있음.</li> <li>○ 독일은 2006년도의 Nuremberg-Ingolstadt 신선에서 콘크리트 궤도인 터널에서 미기압파 문제의 심각성을 인식하고, 2007년부터 ICE 신선에는 터널 미기압파 저감 후드를 적용하고 있음.</li> </ul>																				
<p>3. 연구개발 내용</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 250km/h급 고효율 후드의 실용화를 위한 통합설계 및 평가 기술 개발(복선/단선터널 포함)</li> <li>○ 250km/h급 고효율 후드의 공기역학적 성능평가 및 모니터링 기술 개발(복선/단선터널 포함)</li> <li>○ 국내 고속열차 차량 특성과 철도터널 주변 환경에 대한 미기압파 민감도 연구</li> <li>○ 250km/h급 고효율 후드의 실용화 구조안정성 및 공용중 시공성 향상 기술개발(복선/단선터널 포함)</li> </ul> <table border="1" data-bbox="544 1659 1302 2031"> <thead> <tr> <th>CTE 연차별 TRL성과목표</th> <th>1차년도</th> <th>2차년도</th> <th>3차년도</th> <th>평가방법</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>초고속 터널주행 열차모델 시험장치에 의한 실험상 터널 및 후드 최적설계 제작물</td> <td>5</td> <td>6</td> <td>8</td> <td>관련 전문가 평가 모형시험결과 비교</td> </tr> <tr> <td>주변민가에 미치는 터널 미기압파 환경영향평가의 상용화 S/W</td> <td>5</td> <td>6</td> <td>9</td> <td>현장시험데이터와의 비교검증</td> </tr> <tr> <td>주변 환경과 어울리는 후드 스타일링 산업디자인 결과물</td> <td>5</td> <td>6</td> <td>9</td> <td>관련 전문가 평가</td> </tr> </tbody> </table>	CTE 연차별 TRL성과목표	1차년도	2차년도	3차년도	평가방법	초고속 터널주행 열차모델 시험장치에 의한 실험상 터널 및 후드 최적설계 제작물	5	6	8	관련 전문가 평가 모형시험결과 비교	주변민가에 미치는 터널 미기압파 환경영향평가의 상용화 S/W	5	6	9	현장시험데이터와의 비교검증	주변 환경과 어울리는 후드 스타일링 산업디자인 결과물	5	6	9	관련 전문가 평가
CTE 연차별 TRL성과목표	1차년도	2차년도	3차년도	평가방법																	
초고속 터널주행 열차모델 시험장치에 의한 실험상 터널 및 후드 최적설계 제작물	5	6	8	관련 전문가 평가 모형시험결과 비교																	
주변민가에 미치는 터널 미기압파 환경영향평가의 상용화 S/W	5	6	9	현장시험데이터와의 비교검증																	
주변 환경과 어울리는 후드 스타일링 산업디자인 결과물	5	6	9	관련 전문가 평가																	

3D CFD 해석에 의한 고효율 후드 구조체의 공기역학적 성능평가기법 보고서	5	6	7	관련 평가	전문가
본선 TEST-BED 시제품의 장거리 모니터링시스템(성능평가) 설계 및 데이터 무선전송 시스템 설계도 및 사양서	5	5	8	관련 평가	전문가
본선 TEST-BED의 중앙모니터링을 위한 소프트웨어 및 Web Page 마련	5	6	9	관련 평가	전문가
국내 운행 고속열차와 철도터널 내부 및 터널 외부 지형환경에 대한 터널 미기압파 특성에 대한 보고서	5	6	7	관련 평가	전문가
운행 중인 철도노선에서의 터널입구 후드의 저비용 설치 소재/시공법	5	6	7	관련 평가	전문가
터널입구 후드의 교량설치 구조설계/시공 향상기술 보고서	5	6	7	관련 평가	전문가
콘크리트 후드와 강구조 후드 등에 대한 안전기준 및 지침	5	6	7	관련 평가 시작품 시험평가 검증	전문가
적용소재에 안정성과 신뢰성이 검증된 후드 시제품	6	8	9	관련 평가	전문가
본선 시험부설 TEST-BED에서의 현장시험 및 평가기술 보고서	6	7	8	시험평가에 의한 성능 충족 여부 검증	
후드 시제품을 본선 시험부설 TEST-BED에 구축	5	8	9	시작품 시험평가 및 검증	
250km/h급 운행에서 터널 미기압파 허용기준의 지원 및 개정(안)	6	8	9	관련 평가	전문가

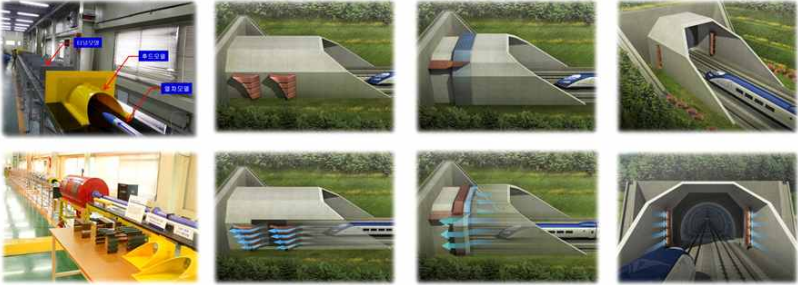
4. 연구개발 추진방법	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 확보된 터널 미기압파 저감 대책 원천기술 활용</li> <li>○ 기존 개발된 원천기술을 활용하고 CFD 시뮬레이션 및 성능 검증을 위해 관련 연구기관 보유 장비 활용(터널주행 열차모델 시험기)</li> <li>○ 실용화를 위해 핵심기술 개발과 테스트베드 구축과 시작품 제작 및 테스트베드 현장검증으로 단계별 기술개발 전략 추진</li> <li>○ 국내외 테스트베드를 상호 교류하는 현장시험으로 폭넓은 데이터뱅크 구축</li> <li>○ 국내외 전문가 활용</li> <li>○ 철도, 건설, 공기역학 관련 전문연구기관의 산학연 협력체계를 구축하여 개발 수행</li> <li>○ 국내 기술수준이 취약한 분야에서 해외 전문기관과 협력체계 구</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 추진전략</li> <li>■ 추진체계</li> </ul>	

축

5. 사업기간 및 소요예산	<ul style="list-style-type: none"><li>○ 사업기간: 2016년~2018년(3년)</li><li>○ 사업예산<ul style="list-style-type: none"><li>- 총사업비: 정부 49억원</li></ul></li></ul>
6. 기타	<ul style="list-style-type: none"><li>○ 터널 미기압파 저감대책의 실용화 및 테스트베드 입지 확보를 위해 철도 관련기관와의 협력 체계 구축 필요</li></ul>

## 2. 총괄 제안요구서(RFP)의 주요연구내용 분류

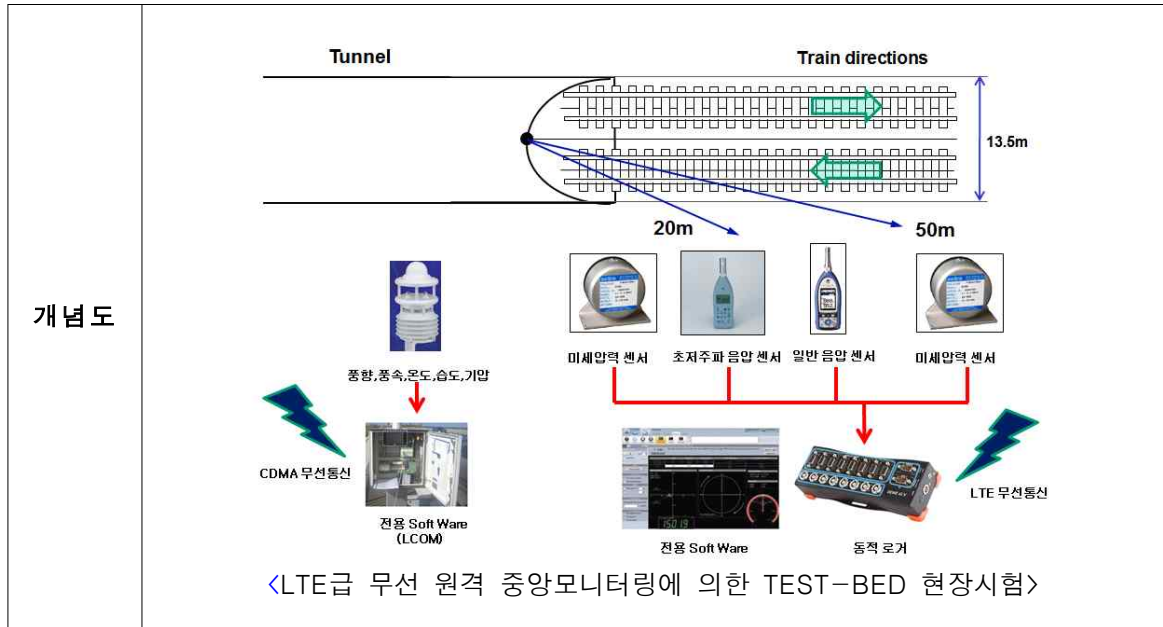
### 가. 250km/h급 고효율 후드의 실용화를 위한 통합설계 및 평가 기술개발

<p><b>개발목표</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 최고성능의 기존대비 20% 향상된 터널 미기압파 저감 후드 실용화 기술개발</li> <li>○ 공용중 시공성을 고려한 구조 및 소재의 터널 미기압파 저감 후드 핵심성능평가 및 시제품 개발</li> <li>○ 본선 TEST-BED 구성을 통한 고효율 터널 미기압파 저감 후드의 실선로 시험평가 및 DB뱅크 구축</li> </ul>
<p><b>주요 연구내용</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 국내외 현장시험 데이터의 분석으로 환경영향평가 경험식의 경험상수 평가</li> <li>○ 초고속 터널주행 열차모델 시험장치에 1/60축척 실험상 터널 및 후드 설계/제작, 실용화 성능평가</li> <li>○ 초고속 터널주행 열차모델 시험장치에 의한 TEST-BED 사양의 1/60축척 사갱 및 기재갱의 실용화 성능평가</li> <li>○ 주변민가에 미치는 터널 미기압파 환경영향평가의 상용화 S/W 개발</li> <li>○ 차세대 고효율 후드의 경제성 평가에 의한 기술가치 평가</li> <li>○ 후드의 첨단소재 및 슬림화 구조 검토 및 적용성 평가</li> <li>○ 주변 환경과 어울리는 후드 스타일링 산업디자인 수행</li> <li>○ 적용소재에 안정성과 신뢰성이 검증된 후드 1차 시작품 제작</li> <li>○ 본선 TEST-BED 시제품 현장시험의 장거리 모니터링시스템 구축</li> <li>○ 250km/h급 운행에서 터널 미기압파 허용기준의 지원 및 개정(안)</li> <li>○ 본선 TEST-BED에서 시제품의 시험평가 모니터링 수행 및 시험결과 분석</li> </ul>
<p><b>기술개발 방향성</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 2014년도의 “차세대 고효율 미기압파 저감후드 원천기술”을 활용하여, 본선 TEST-BED에 시작품 제작 설치하여 성능검증 및 실용화</li> <li>○ 본선 TEST-BED에서의 현장시험에 앞서서, 실용화 최종형상 모델에 대하여 1/60축척 터널주행 열차모델 시험장치로 터널 내부구조 및 주변지형을 고려한 현장 최적화 시험 수행</li> <li>○ 공용중 시공성을 향상시키기 위한 첨단소재 마감 및 슬림화 골조 적용기술 개발</li> <li>○ 적용 소재의 안정성과 신뢰성을 검증하고, 주변 환경과 어울리는 산업디자인이 적용된 시작품 설계 및 현장시공</li> <li>○ 현장시험 DB 뱅크를 활용한 터널 미기압파 환경영향평가 상용화 S/W 개발</li> <li>○ 본선 TEST-BED 연장별 터널들에서 터널 미기압파 현장시험 및 DB 구축</li> <li>○ LTE급 원격 상시 중앙 모니터링 시스템 구축으로 기상상황별 및 터널내 기류에 따른 민가에 서의 터널 미기압파 영향 DB 구축</li> <li>○ 250km/h급 열차운행에서의 터널미기압파의 허용기준 제정지원 및 개정작업</li> </ul>
<p><b>개념도</b></p>	<div style="text-align: center;">  <p>&lt;차세대 고효율 미기압파 저감후드 원천기술(확보된 기술)&gt;</p> </div>



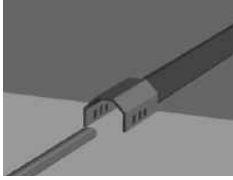
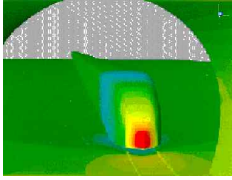
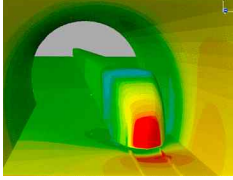
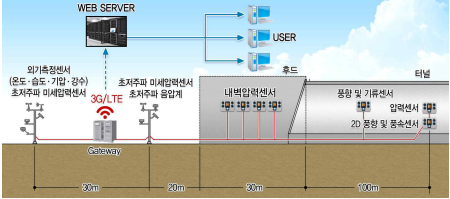
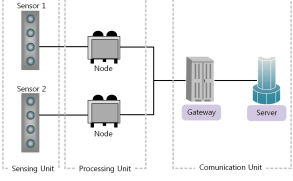
나. 개발기술의 성능과 안전성 확보를 위한 TEST-BED 현장시험

<b>개발목표</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 실제 터널에 대한 TEST-BED 설치를 통하여 고속열차 주행 시의 미기압파 발생을 현장시험하고, 이에 대한 데이터베이스를 원격으로 구축함으로써 실험 및 해석적 방법의 한계를 극복하고 국내 터널에 최적화된 환경영향평가 및 대응기술 완성</li> <li>○ 고효율 미기압파 저감 후드 시제품에 대한 TEST-BED 현장시험 및 성능평가로 실용화</li> </ul>
<b>주요 연구내용</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 본선 시험부설 TEST-BED 구축 방안</li> <li>○ 개발기술 현장 평가기법 제시</li> <li>○ 시제품 제작시공(현장 시험부설), 현장시험 및 평가</li> <li>○ 모니터링 시스템 구축을 통한 데이터베이스 축적 기반 수립</li> </ul>
<b>기술개발 방향성</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ TEST-BED는 개통예정인 터널들에 미기압파의 상시 모니터링 시스템을 구축하고 열차 운행 조건 및 기상상태, 미기압파 및 터널내 압력변동 등을 측정할 수 있도록 구성하고, 열차운행 시 발생하는 미기압파 등의 계측 데이터를 중앙의 서버로 무선통신망을 이용하여 전송하여 중앙의 클라우드 시스템에서 빅-데이터를 실시간으로 처리하여 계측 데이터를 분석/평가</li> <li>○ TEST-BED에서의 현장시험은 크게 2가지로 구분하여 미기압파 저감 대책을 적용하지 않은 터널들과 터널 미기압파 저감 대책이 적용된 터널에 대하여 수행(미기압파 대책 미적용 터널은 터널연장별로 4개소 터널에 대하여 수행 필요함)</li> </ul>



다. 250km/h급 고효율 후드의 공기역학적 성능평가 및 모니터링 기술개발

<p><b>개발목표</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 3D CFD 해석에 의한 고효율 후드 구조체의 공기역학적 성능평가 기술개발을 수행하여, TEST-BED 현장시험을 위한 계측센서 네트워크 구성 및 LTE급 무선 원격 중앙모니터링 기술개발</li> </ul>
<p><b>주요 연구내용</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 3D CFD 의한 고효율 후드 구조체의 공기역학적 성능평가기법 개발</li> <li>○ 본선 TEST-BED에서의 다목적 시험용 후드의 통풍관 개구부의 면적 원격제어 및 계측 인터페이스 설계 연구</li> <li>○ 본선 TEST-BED에서의 계측지그, 시그널 케이블링 배치, 콘트롤 박스 구성 및 인터페이스 설계(중앙모니터링-빅데이터의 LTE급 무선전송 시스템)</li> <li>○ 본선 TEST-BED에의 다목적 시험용 후드의 중앙 모니터링 SW 작성 및 구축, 빅데이터 분석/처리</li> <li>○ 본선 Test-Bed 노선 터널들의 사양, 사갱, 기재갱, 터널 주변 민가 및 이격거리 도면화, 데이터 베이스화</li> </ul>
<p><b>기술개발 방향성</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 고효율 후드의 실용화를 위해서는 다양한 형상 및 주변조건의 모사에 의한 정확한 예측이 필요하며, 이는 해석적 방법과 실험적 연구, 현장에서의 실측에 의한 데이터가 모두 필요함. 특히, 후드구조체의 형상변경 및 주변지형의 변경에 대한 패러미터 연구는 실험적 방법으로 모두 분석이 곤란하므로 이를 3D CFD에 의하여 분석하여 데이터베이스화하고 예측 SW에 반영하여야 함</li> <li>○ 현장계측시스템은 열차의 주행속도, 터널내 압력, 후드 내부 및 입구부의 압력 및 풍향풍속뿐 아니라 터널 주변의 기상여건까지 계측하여 열차통과시에 발생하는 다양한 변수에 의한 미기압파 발생량에 대한 영향을 감안할 수 있도록 설치하여야 함</li> <li>○ 기존의 현장실측은 터널당 수일간의 관측을 통하여 데이터를 수집하였으나, 본 연구의 TEST BED 구축 시에는 현장에 장기간 계측장비를 설치하여 관측함으로써 시간대비 많은 양의 데이터를 확보할 수 있으며, 이를 토대로 미기압파 크기에 영향을 주는 변수에 대한 변동추이를 추적할 수 있음. 이를 위하여 터널 현장과 연구수행자의 개인용 PC를 실시간으로 연결할 수 있는 모니터링 시스템의 구축이 필수적임</li> <li>○ 모니터링 시스템은 무선통신망을 이용한 인터넷 웹페이지와 저장서버로 구성되며, 데이터 분석에 필요한 제반기능을 갖추도록 구성</li> </ul>

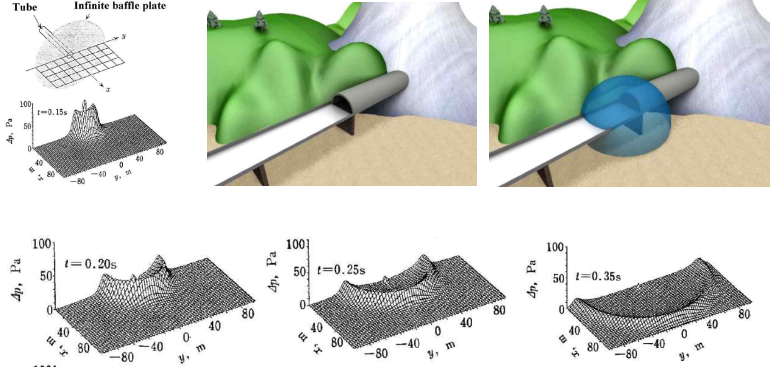
<p><b>개념도</b></p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">    </div> <p style="text-align: center;">&lt;3D CFD 의한 후드 구조체의 공기역학적 특성평가&gt;</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div> <p style="text-align: center;">&lt;계측센서 네트워크 및 LTE급 무선 원격 중앙모니터링 기술&gt;</p>
-------------------	--

라. 250km/h급 고효율 후드의 실용화 구조안정성 및 공용중 시공성 향상 기술개발

<p><b>개발목표</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 운영중 철도터널에도 시공이 가능하고 외관이 미려하며, 후드구조가 열차의 반복적인 열차풍과 진동에도 내구성 있어야 하며, 저비용/고효율로 건설이 가능한 구조설계 및 시공기술 개발</li> </ul>
<p><b>주요 연구내용</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 운행 중인 철도노선에서의 터널입구 후드의 저비용 설치 소재/시공법 개발</li> <li>○ 터널입구 후드의 교량설치 구조설계/시공 향상기술 개발</li> <li>○ 후드의 첨단소재 검토 및 슬림화 구조 후드의 공진방지 및 내진성능 해석평가 및 시험평가 모니터링, 시험결과 분석</li> <li>○ 본선 TEST-BED에서의 구조안정성 및 시공성 향상 기술 연구</li> <li>○ 본선 TEST-BED 현장시험의 다목적 시험용 후드의 실시 설계도면 작성</li> <li>○ 250km/h급 실용화를 위한 최적설계의 고효율 후드의 실시설계 도면 작성</li> <li>○ 콘크리트 후드와 강구조 후드 등에 대한 안전기준 및 지침 마련</li> </ul>
<p><b>기술개발 방향성</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 터널 미기압파 저감 후드는 철도건설 중에 설치하는 방법과 시운전시험이나 개통후에 즉, 운행 중에 설치하는 방법으로 나눌 수 있다.</li> <li>○ 철도 건설 중에 후드를 시공하는 방법은 기존의 개착식 터널 시공기술로 가능하여 현장타설 공법을 적용하던지 프리 캐스트 콘크리트 공법으로 시공을 할 수 있다. 다만 터널출구와 후드 구조물 시작부의 내공 단면적이 다르기 때문에 이에 대한 간편한 보강기술이 필요하다.</li> <li>○ 국내에서는 매우 큰 단면적의 철도터널을 최근까지 적용하였기 때문에 국내에 미기압파가 크게 발생하는 현장과 경험이 없어서, 최적의 소단면적의 터널을 적용한 원주-강릉 신선부터는 시운전시험에서 미기압파가 크게 터져 나오면 공용중인 상황에서 후드를 설치하여야 한다.</li> <li>○ 공용 중에 후드를 설치하는 방법으로는 금속골조(H-빔 등)를 이용하여 데크-플레이트로 마감하는 방법이 있는데 이 때 대형 크레인이 들어가기 위한 진입도로를 만들어주어야 하고, 전차선 전봇대를 이설해야 하고, 작업공간을 위해 철도변 사면을 일부 붕괴시켜야하며 심야에 2~3시간의 짧은 작업시간이 허용되기 때문에 철도건설 중에 설치하는 것보다 3~6배의 시공비가 소요된다(일본 신칸센 사례). 또한 터널출구에서 바로 교량으로 이어지는 경우에는 교량위에 후드를 저비용으로 시공할 수 있는 기술개발이 필요하다.</li> <li>○ 이에 첨단소재 마감과 간편한 골조 구조로 조립성이 우수하고, 공용중 시공성과 공사기간을 짧게 할 수 있는 후드 구조체에 대한 기술개발이 필요하다.</li> </ul>

개념도	 <p>〈대만 고속철도 터널 입구 후드〉   〈일본 규슈 신칸센 터널 입구 후드〉   〈일본 도호쿠 신칸센 터널 입구 후드〉</p>
	 <p>〈프랑스 고속철도 터널 입구 후드〉   〈중국 고속철도 터널 입구 후드〉   〈독일 고속철도 터널 입구 후드〉</p> <p>〈세계 각국의 터널 미기압파 저감 후드〉</p>

마. 국내 고속철도 차량특성과 철도터널 주변환경에 대한 미기압파 민감도 연구

개발목표	<ul style="list-style-type: none"> <li>고속열차와 철도터널의 고유사양과 터널출구 외부 지형환경에 대하여 즉, 국내 운영환경에서의 터널 미기압파 초저주파 특성과 방사패턴의 특성을 분석/평가하여 허용기준 개정안과 환경영향평가 프로그램에 반영</li> </ul>
주요 연구내용	<ul style="list-style-type: none"> <li>TEST-BED 노선의 터널 출구개문 형상에 따른 미기압파 3차원 방사패턴 분석연구</li> <li>TEST-BED 노선의 터널 출구외부 지형환경에 따른 미기압파 3차원 방사패턴 연구</li> <li>국내 콘크리트 궤도 터널의 터널내 상세사양에 대한 방사 미기압파의 주파수 특성 연구</li> <li>250km/h급 국내외 고속열차와 터널 사양에 대한 방사 미기압파 크기의 비교 연구</li> <li>미기압파의 크기 및 FFT 분석에 따른 국내 민가분포 특성에 미치는 영향 평가</li> </ul>
기술개발 방향성	<ul style="list-style-type: none"> <li>국내 운행 또는 운행예정인 고속열차 사양과 국내 철도터널에 적용하고 있는 레다-2000 콘크리트궤도의 형상특성, 터널내 각종 케이블 매설의 공동구 구조특성, 기재강 제원특성을 반영하여 미기압파 주파수 특성 연구 필요</li> <li>국내에서 적용하는 철도터널들의 경사개문의 경사각도와 3차원 형상특성을 반영하여 터널 미기압파의 방사패턴을 분석하고 특성을 파악</li> <li>국내 철도터널 사양에서 터널 미기압파의 크기에 따른 FFT 주파수 분석으로 미기압파 허용 기준치의 개정에 활용</li> </ul>
개념도	 <p>〈고속열차와 철도터널 주변지형에 따른 미기압파의 방사 패턴〉</p>

## 6장 참고문헌

- [1] S. Ozawa, 1976, Investigation of Pressure Wave Radiated from a Tunnel Exit, The Railway Technical Research Institute, Railway Technical Research Report, NO. 1023 (In Japanese).
- [2] S. Ozawa, 1979, Studies of Micro-pressure Wave Radiated from a Tunnel Exit, The Railway Technical Research Institute, Railway Technical Research Report, NO. 1121 (In Japanese).
- [3] 이수갑, 윤태석, 정원태, 이동호, 김동현, 강신재, 1998, “고속 전철에 의한 터널 출구에서의 충격성 소음(소닉붐)의 예측 및 실험적 연구,” 한국철도학회 추계학술대회, pp 369-378
- [4] 한국건설기술연구원, 위탁연구기관 : 김동현 외, 1998, “고속철도 터널의 공력학적 설계기술개발(터널미기압과 저감대책),” 한국철도기술연구원,
- [5] 김동현 외, 1998, “고속철도 터널의 공력학적 설계기술개발,” 건설교통부 G7 고속전철기술 개발사업, 한국철도기술연구원.
- [6] 김동현 외, 1999, “G7 고속철도 터널 공력설계 및 터널 후드 개발,” 1단계 3차년도, 한국철도기술연구원
- [7] 김동현, 이재범, 양신추, 이희성, 오일근, 1999, “입구후드가 고속열차 터널의 압력에 미치는 영향에 대한 수치해석적 연구,” 한국철도학회 춘계학술대회, pp 406-413
- [8] 김동현 외, 2002, “G7 고속철도 터널 공력설계 및 터널 후드 개발,” 2단계 3차년도, 한국철도기술연구원
- [9] 김동현 외, 2007, 선로중심간격 및 노반폭 기준(안)에 대한 평가보고서-호남고속철도 건설사업 기본설계-, 기업수탁, 한국철도기술연구원
- [10] 신대용 외, 2012, “3차원 형상을 고려한 고속철도에 의한 터널내 압력과 전파의 CFD해석”, 한국전산유체공학회
- [11] 김태운 외, 2002, “혼합차원기법을 이용한 고속열차의 터널 통과시 발생하는 비정상 압축성 유동장의 수치해석”, 한국항공우주공학회지
- [12] 김동현, 서용철, 2013, “고속열차의 터널진입 압축과 예측에 관한 경험식 연구,” 한국철도학회 2013년도 추계학술대회
- [13] 김사량, 2006, “열차가 터널내 진입할 때 발생하는 압축파에 대한 수치해석”, 대한설비공학회 논문집
- [14] 성현경, 2012, “CDMA통신망을 이용한 상수도 통합관리시스템 개발”, 산학협동재단
- [15] 김광현, 2011, “Zigbee 모듈을 이용한 실시간 센서 모니터링 시스템 구현”, 한국전자통신학회 논문지
- [16] 한국방송통신전파진흥원, 2014, “무선센서 네트워크 기반 IoT를 위한 통신기술”, 방송통신기술 이슈&전망
- [17] 정운철외, 2010, “무선센서 네트워크 MAC 표준기술동향”, 한국정보통신기술협회, TTA 저널
- [18] 최상성외, 2011, “스마트 유틸리티 네트워크를 위한 무선전송기술 표준화동향”, 한국정보

통신기술협회, TTA저널

- [19] 한국콘크리트학회, 2007, “프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 구조설계 핸드북”
- [20] 강호석, 김선우, 이승호, 김낙영, 2006, “개착부 파형강관 시공사례”, 제6회 터널 시공기술 향상 대토론회 논문집, pp.117-129.
- [21] 김동현, 서용철, 2012, “호남고속철도 400km/hr급 증속구간의 터널 미기압과 저감대책 보고서”, 한국철도기술연구원
- [22] 김정호, 정형식, 2004, “개착식 터널에서 파형강관 라이닝 적용을 위한 해석적 연구”, 한국터널공학회논문집, Vol.6, No.1, pp.3~16.
- [23] 건설교통부, 2008, “리브 보강형 프리캐스트 아치를 이용한 개착터널의 설계 및 시공법 개발”, 건설핵심기술연구개발사업 최종보고서
- [24] T. Fukuda, 1999, “Study on Compression Wave Propagating through High-Speed Railway Tunnels,” RTRI Research Report Special NO. 28, Railway Technical Research Institute, Japan National Railways, Japan
- [25] D. H. Kim, & H. B. Kwon, 2006, “Field tests on the Pressure Transients in Train-Tunnel Interfaces on the Korean Railway”, In Proceedings of the 12th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Slovenia.
- [26] M. Schlämmer & M. Hieke, 2008, “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 & Applications
- [27] Jakub Novák, 2006, “Single Train Passing Through A Tunnel“, European Conference on Computational Fluid Dynamics
- [28] Chia-Ren Chu, 2014, “Numerical simulation of two trains intersecting in a tunnel“, ELSEVIER
- [29] David UystepuystMame, 2012, “Efficient 3D numerical prediction of the pressure wave generated by high-speed trains entering tunnels“, hal.archives-ouvertes.fr
- [30] T. Maeda, 2004, “A Micro-pressure Wave Radiating from a Tunnel Portal,” 18th International Congress on Acoustics, Kyoto, Japan, April, pp 1319-1322
- [31] R. Kay & F. Mattern, 2004, “The Design Space of Wireless Sensor Networks“, IEEE Wireless Communications Vol 11
- [32] [www.zigbee.org](http://www.zigbee.org)
- [33] [www.bluetooth.org](http://www.bluetooth.org)
- [34] [www.ieee.org](http://www.ieee.org)
- [35] 김희동, 1994, “고속철도 터널에서 발생하는 유체역학적 파동현상,” 대한기계학회, Vol.34, No. 10, pp 796-807
- [36] 서울대학교 정밀설계기술 공동연구소, 위탁연구기관 : 김동현 외, 1998, “고속전철 비정상 시험장치 1차개발 및 기본모델 공력시험,” 한국철도기술연구원
- [37] 김동현, 오일근, 2001, “압축공기 발사기에 단선 와이어 유도방식을 적용한 1/60축척 터

널주행 열차모형 시험기 개발에 대한 연구,” 대한기계학회 논문집 B권, 제25권, 제5호, pp. 634-644.

- [38] 김동현 외, 1999, “터널 미기압과 저감을 위한 강제후드 개발연구,” 한국철도기술연구원.
- [39] 김동현, 2000, “경춘선 1급 신설터널에서 열차승객의 이명감 없이 주행 가능한 열차속도에 대한 연구,” 한국철도학회 춘계학술대회, pp 495-502
- [40] 김동현, 강부병, 이재환, 오일근, 김형진, 2000, “연속터널에서 터널출구 미기 압파를 저감할 수 있는 스노우 셸터 개발,” 한국철도학회 추계학술대회, pp 390-395
- [41] 김동현 외, 2000, “G7 고속철도 터널 공력설계 및 터널 후드 개발,” 2단계 1차년도”, 한국철도기술연구원
- [42] 김동현 외, 2001, “G7 고속철도 터널 공력설계 및 터널 후드 개발,” 2단계 2차년도, 한국철도기술연구원
- [43] 김동현, 서용철, 2013, “420km/h급 고속철도에서 터널 미기압과 저감후드의 통풍관 높이 변화에 따른 영향,” KSCE2013 CONVENTION, P2-244
- [44] 김동현, 서용철, 2013, “250km/h급 고속철도 초장대터널의 미기압과 저감대책 연구,” KSCE2013 CONVENTION, P2-273
- [45] 김동현, 서용철, 2013, “고속열차의 터널진입 압축과 예측에 관한 경험식 연구,” 한국철도학회 2013년도 추계학술대회
- [46] 김동현, 서용철, 2013, “420km/h급 고속철도에서 통풍관 면적변화에 따른 후드의 미기압과 저감성능에 관한 연구,” 한국철도학회 2013년도 추계학술대회
- [47] T. Hara, 1960, “Aerodynamic problems when train is running into tunnel with large velocity, ” Railway Technical Research Report (in Japanese), 153, September, 1-20
- [48] T. Maeda 1996, “Review of Micro-pressure Wave Radiating from Tunnel Portal and Pressure Variation under Train Passage”, RTRI report, Vol. 10, No. 2, pp. 5~10 (In Japanese).
- [49] D.H. Kim, 1999, Hood by train tunnel , Korean Patent No. 1003319550000.
- [50] A. Yamamoto, 1977, “Micro-pressure wave radiated from tunnel exit,” Preprint of the spring meeting of physical society of Japan (in Japanese)
- [51] A. Yamamoto, 1984, “Reduction of Micro-pressure wave radiated from tunnel exit by side branches in tunnel,” Japanese National Railway Quarterly Report, Vol 25, No 3
- [52] S. Ozawa, and T. Maeda, 1988, “Model Experiment on Reduction of Micro-Pressure wave Radiated from Tunnel Exit,” JSME, International Symposium on Scale Modeling, Tokyo, July 18-22
- [53] B. Dayman, A. Vardy, 1991, “A gun-fired 0.5% Scale Facility for Pressure Transients Tests of Very High Speed Trains in Tunnels“, 7th international Symposium on AVVT, pp 757-787
- [54] C. W. Pope, 1991, “The simulation flows in railway tunnels using a1/25 the scale moving model facility,” 7th international Symposium on AVVT, pp 709-737
- [55] K. Matsuo, T Aoki, H. Kashmura, M. Kawaguchi, N. Takeuchi, 1991, “Attenuation of

- compression waves in a high-speed railway tunnel simulator,” 7th international Symposium on AVVT, pp 239-252
- [56] S. Ozawa, T. Maeda, T. Matsumura, K. Uchida, H. Kajiyama, K. Tanemoto, 1991, “Countermeasures to reduce micro-pressure waves radiating from exits of shinkansen tunnels,” 7th international Symposium on AVVT, pp 253-266
- [57] Peiffer A, Ottitsch F, Sockel H, 1994, “Experimental and theoretical investigation of two and three dimensional pressure waves propagating inside a tunnel due to a train passage,” 8th international conference on AVVT, pp 151-174
- [58] K. Matsuo, T. Aoki, Hideo. Kashmura, T. Yasunob, U, S, Mashimo, 1994, “Generation mechanism of impulsive wave emitted from high-speed railway tunnel exit,” 8th international conference on AVVT, pp 199-209
- [59] S. Ozawa, T. Maeda, T. Matsumura, K Nakatani, K. Uchida, 1994, “Distortion of compression wave during propagation along shinkansen tunnel,” 8th international conference on AVVT, pp 211-226
- [60] W. B. de Wolf, E. Demmenie, 1997, “A new test facility for the study of interacting pressure waves and their reduction in tunnels for high-speed trains,” 9th international Symposium on AVVT, pp 301-317
- [61] G. Figura-Harda, R. G. Gawthorpe, A. E. Vardy, 1997, “Guidance for aerodynamic sizing the cross-section of railway tunnels,” 9th international Symposium on AVVT, pp 319-329
- [62] K. Ehrendorfer, H. Sockel, 1997, “The influence of measures near the portal of railway tunnels on the sonic boom,” 9th international Symposium on AVVT, pp 863-903
- [63] T. Oda, M. Mitsuda, T. Tanaka, I. Yamagiwa, T. Nakura, M. Oishi, 1997, “A numerical simulation of compression wave generated by a train entering a tunnel,” 9th international Symposium on AVVT, pp 905-924
- [64] K. matsuo, T. Aoki, S. Mashimo, E. Nakatsu, 1997, “Entry compression wave generated by a high-speed train entering a tunnel,” 9th international Symposium on AVVT, pp 925-934
- [65] S. Ozawa, K. Murata, T. Maeda, 1997, “ Effect of ballasted track on distortion of pressure wave in tunnel and emission of micro-pressure wave,” 9th international Symposium on AVVT, pp 935-947
- [66] M. S. Howe, 1998, “Mach number dependence of the compression wave generated by a high-speed train entering a tunnel,” *Journal of sound and vibration*, pp 23-36
- [67] Vardy, A. E. and Reinke, P., 1999, “Estimation of train resistance coefficients in tunnels from measurements during routine operation,” *Proc. Instn Mech Engrs Vol. 213 Part F*, pp.71-87
- [68] T. Aoki, A. E. Vardy and J. M. B. Brown, 1999, “Passive alleviation of micro-pressure waves from tunnel portals,” *Journal of sound and vibration*, pp. 921-940

- [69] A. E. Vardy and J. M. B. Brown, 2000, "Influence of ballast on wave steepening in tunnels," *Journal of sound and vibration*, pp 595-615
- [70] K. Matsubayashi, J. Brown and A. E. Vardy, 2000, "Sonic booms-Do I have a problem?," *BHRGroup AVVT 10*, pp 185-202
- [71] T. Johnson, T. Prevezer and G. I. Figura-Hardy, 2000, "Tunnel pressure comfort limits examined using passenger comfort ratings," *BHRGroup AVVT 10*, pp 221-239
- [72] R. G. Gawthorpe, 2000, "Tunnel aerodynamic design within the European high-speed rail network," *BHRGroup AVVT 10*, pp 203-219
- [73] J. Brown, A. E. Vardy, 2000, "The use of ballast to attenuate wavefronts," *10th international Symposium on AVVT*, pp 701-718
- [74] E. C. Klaver, E. Kassies, 2000, "Dimensioning of tunnels for passenger comfort in the Netherlands," *10th international Symposium on AVVT*, pp 737-755
- [75] S. Ozawa, K. Murata, 2000, "A pressure wave emitted from openings of tunnel wall," *10th international Symposium on AVVT*, pp 757-765
- [76] M. Iida, K. Kikuchi, T. Fukuda, 2000, "A pressure wave radiated from a tunnel entrance when a train enters a tunnel," *10th international Symposium on AVVT*, pp 779-797
- [77] P. Pesava, H. Sockel, 2000, "The effect of baffle plates on the propagation of compression waves through a tunnel," *10th international Symposium on AVVT*, pp 799-814
- [78] T. Johnson, S. Dalley, 2000, "Moving model rig tests on a tunnel with a porous entrance and with an air shaft - measurements and validation of THERMOTUN predictions," *10th international Symposium on AVVT*, pp 815-827
- [79] R. G. Gawthorpe, 2000, "Tunnel aerodynamic design within the European high-speed rail network," *10th international Symposium on AVVT*, pp 203-219
- [80] Kim, Dong-Hyeon and Shin, Min-Ho, 2001, "The aerodynamic effect of air-shafts in the single track tunnel with small cross sectional area on conventional line," *World Congress on Railway Research, Koln, Germany, November 25-29*
- [81] A. Baron, M. Mossi, S. Sibilla, 2001, "The alleviation of the aerodynamic drag and wave effects of high-speed trains in very long tunnels," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol 89*, pp 365-401
- [82] J. A. Schetz, *Mech.* 2001, "Aerodynamics of High-Speed Trains," *Annu. Rev. Fluid Vol. 33*, pp 371-414.
- [83] J. Herb, P. Deeg, T. Tielkes, 2003, "Assessment of possible sonic boom effects in German high-speed railway tunnels-experimental and numerical data for the wave steepening process," *11th international Symposium on AVVT*, pp 775-782
- [84] P. DA. Costa, A. Willaime, 2003, "Model rig measurements for SNCF new tunnel portal designs," *11th international Symposium on AVVT*, pp 795-807
- [85] M. Bellenoue, 2003, "Tunnel openings to reduce the pressure gradient of the

- compression wave generated by a train entry into a tunnel: mechanism and efficiency,” 11th international Symposium on AVVT, pp 845-856
- [86] S. Ozawa, 2003, “Countermeasures for reducing micro-pressure wave at the stage of propagation of the compression wave through a tunnel,” 11th international Symposium on AVVT, pp 389-402
- [87] M. S. Howe, 2004, “On the design of a tunnel-entrance hood with multiple windows,” *Journal of sound and vibration*, pp 233-248
- [88] D. H. Kim, 2006, “Aerodynamic performance of airshafts and slit & slit-cover hoods for rail way tunnels using moving model tests,” *BHR Group AVVT 12*, pp 359-377
- [89] B. Hagen and A. Vardy, 2006, “Effectiveness of pressure relief shafts – full scale assessment,” *BHR Group AVVT 12*, pp 379-391
- [90] J. Temple, 2006, “West coast main line upgrade : railway tunnel pressure relief in practice,” *BHR Group AVVT 12*, pp 613-622
- [91] S. Saito, T. Miyachi, T. Fukuda, H. Takami, M. Lida and H. Kajiyama, 2006, “Pressure changes generated inside and outside a tunnel with a shaft in high-speed railway,” *BHR Group AVVT 12*, pp 763-775
- [92] T. Fukuda, T. Miyachi and M. Lida, 2006, “Propagation of compression wave in a long slab-tracked tunnel and ballast-tracked tunnel,” *BHR Group AVVT*, pp 777-788
- [93] H. Sockel, P. Pesava, 2006, “The reduction of micro pressure waves by baffles,” *BHR Group AVVT 12*, pp 805-817
- [94] Y. Takakuwa, S. Nozawa, 2006, “Model experiment for an improved tunnel entrance hood,” *JR EAST Technical Review NO. 8*
- [95] A. Baron, P. Molteni, L. Vigevano, 2006, “High-speed trains : Prediction of micro-pressure wave radiation from tunnel portals,” *Journal of sound and vibration*, pp 59-72
- [96] K. G. Degen, Ch. Gerbig, J. Onnich, 2007, “Acoustic assessment of micro- pressure waves radiating from tunnel exits of DB high-speed lines,” *9th International Workshop on Railway Noise*
- [97] Th. Tielkes, H.-J. Kaltenbach, M. Hieke, P. Deeg, M. Eisenlauer, 2007, “Measures to counteract micro-pressure waves radiating from tunnel exits of DB’s new Nuremberg-Ingolstadt high-speed line,” *9th International Workshop on Railway Noise*
- [98] K. Sakurai, K. Saeki, Y. Takakuwa, A. Watanabe, 2008, “Development of new tunnel entrance hood,” *JR EAST Technical Review NO. 12*
- [99] P. Ricco, A. Baron, P. Molteni, 2009, “Nature of pressure waves induced by a high-speed train travelling through a tunnel,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*

## 주 의

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