보안 과제( ), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개( ) 발간등록번호(11-B552989-000323-01)

건설기술연구사업 최종보고서

R&D / 19SCIP-B089409-06

대심도 복층터널 설계 및 시공 기술 개발 최종보고서

2020. 06. 30.

주관연구기관 / 한국건설기술연구원
협동연구기관 / 한서대학교 산학협력단
참여기관 /

건국대학교 산학협력단
㈜골든엔지니어링
㈜다산컨설턴트
㈜대흥미래기술
㈜동일기술공사
㈜범창종합기술
㈜브이테크
성균관대학교 산학협력단
㈜엔세라텍
유원컨설턴트㈜
㈜제이에스시솔루션
㈜주성지앤비
㈜케미우스코리아
㈜포스코건설
한양대학교 산학협력단
㈜홍지
경희대학교 산학협력단
㈜네오시티
㈜단우기술단
동국대학교 산학협력단
롯데건설㈜
㈜보임정보기술
㈜삼보기술단
신한대학교 산학협력단
영일공업㈜
인하대학교 산학협력단
㈜제이엔티아이엔씨
㈜지윤이앤씨
㈜포숲이앤알
㈜하경엔지니어링
호서대학교 산학협력단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

19SCIP-B089409-06

대심도 복층터널 설계 및 시공 기술 개발 최종보고서

2020

국토교통과학기술진흥원

국 토 교 통 부

제 출 문

국토교통부 (국토교통과학기술진흥원장) 귀하

'대심도 복층터널 설계 및 시공기술 개발'(연구개발 기간 : 2014. 12. 08. ~ 2020. 06.30.) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2020. 06. 30.

주관연구기관명 : 한국건설기술연구원 (대표자) 한 승 헌 (인)

협동연구기관명 : 한서대학교 산학협력단 (대표자) 김 현 성 (인)

협동연구기관명 : 한국건설기술연구원 (대표자) 한 승 헌 (인)

주관연구기관책임자 : 김 창 용 (인)

협동연구기관책임자 : 박 인 준 (인)

협동연구기관책임자 : 유 용 호 (인)

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

요약문

연구의 목적 및 내용	○ 본 과제의 최종목표는 도심지 대심도에 건설되는 다목적 복층터널을 건설하고 운용하는데 필요한 설계 및 시공, 환기 및 화재안전의 핵심 기술을 국내기술로 확보하는 것임. ○ 이를 위하여 ① 네트워크 지하도로망 구축 및 다목적 기능의 복층터널 설계기술 확보, ② 확폭, 분기부 등을 효율적으로 구축하고 경제적이고 최적화된 복층터널을 시공하는 기술을 확보, ③ 지하 네트워크의 환기 및 화재 안전에 대응하고, 복층터널 구조체의 손상평가 기술 개발을 목표로 함. ○ 본 연구는 병렬터널 대비 공사비 15% 절감과 이용자의 100% 안전확보를 목적으로 하고 있으며, 이를 위한 연구내용 및 범위는 다음과 같음. [제1세부과제] 복층터널 최적화 설계기술 개발 - 제1요소기술 : 복층터널 최적화 단면 설계기술 - 제2요소기술 : 복층터널 구조체 설계 및 성능평가 기술 - 제3요소기술 : 복층터널 근접시공 안정성 확보를 위한 설계기술 - 제4요소기술 : 복층터널 내부시설 운전자 친화 설계 기술개발 및 가상 프로젝트 - 제5요소기술 : 복층터널 다목적 활용 설계 및 운용 기술 [제2세부과제] 효율적인 복층터널 시공기술 개발 - 제1요소기술 : 복층터널 최적화 시공을 위한 굴착·보강, 구조체 유지관리 기술개발과 Test-bed - 제2요소기술 : 도심 대심도 수직구의 친환경 시공기술 개발 - 제3요소기술 : 도심 대단면 복층터널 고함수비 굴착버력 친환경 급속 처리 기술 개발 [제3세부과제] 복층터널 환기 및 화재안전 설계 기술 개발 - 제1요소기술 : 복층터널 네트워크형 환기설계 및 해석 기술개발 - 제2요소기술 : 복층터널 오염물질 확산 예측 및 외부 배출 방지 기술 - 제3요소기술 : 복층터널 화재확산 제어 및 내화 성능 향상 기술 - 제4요소기술 : 복층터널 화재안전 평가 및 관리시스템 구축
연구개발성과	○ 복층터널 최적화 단면 설계 기술 ○ 복층터널 구조체 설계 및 성능평가 기술 ○ 복층터널 근접시공 안전성 확보를 위한 설계 기술 ○ 운전자 친화 설계 기술 및 가상프로젝트 ○ 확폭 분기부 굴착을 위한 굴착, 보강 및 특수 세그먼트 제작 기술 ○ 복층터널 유지관리를 위한 내부형상 모니터링 및 생애전주기 관리 기술 ○ 슬래브 제작 기술, 가설 장비를 이용한 가설 기술 ○ 도시지역 대심도 수직구 친환경 급속 시공 기술 ○ 도시지역 굴착버력의 갱내·갱외 급속 처리 기술 ○ 네트워크형 환기설계 지침 ○ 네트워크형 환기해석 엔진 및 전처리 모듈 ○ 소형차 오염물질 및 연소 시 기준 배출량 DB ○ 복층터널 환기 시스템 운전제어 알고리즘 ○ 오염물질 외부 배출 영향 최소화 기술 ○ 화재 연동형 대배기구 시스템

	○ 복층 슬래브 최적 내화 및 보수 기술 ○ 복층터널 화재연기 확산지연장치 ○ 자동화 소화설비 ○ 터널방재시스템 화재시나리오 ○ 스마트폰용 피나어플
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	[기술적 기대성과] ○ 대심도 복층터널의 설계·시공 및 운영기술이 다소 부족한 상황에서 본 연구를 통하여 핵심기술을 확보함으로서 우리나라의 지하 교통 네트워크 구축 기술을 향상 시킬 수 있음. ○ 우리나라의 대심도 복층터널 설계 및 시공 기술은 선진국의 60% 정도로서, 서울시의 U-SMARTWAY와 같은 거대 프로젝트의 독자기술 기반으로 추진하기에는 어려움이 있으나, 본 과제의 성공적인 수행으로 국내기술을 기반으로 하는 신개념의 복합기능 복층터널을 도입하는 계기를 마련할 수 있음. ○ 복층터널을 기반으로 하는 대심도의 지하 교통 네트워크에서 이용자의 편익을 확보하고 100% 안전을 보장하기 위해서는 환기 및 화재 안전에 대비하는 기술 확보가 필요하며, 개발된 기술이 지하공간 이용의 증대를 견인할 수 있음. [사회·경제적 파급효과] ○ 국내·외적으로 도시화가 가속화 되고 있는 상황에서 대심도 교통 지하네트워크의 수요가 증가하고 있음. 국내에서는 U-SMARTWAY, GTX, 수도권지하고속도로, 부산지하고속화도로 등이 제안되고 있으며, 각각 11조 2천억원, 12조원, 17조원(6차로 건설시 21조원), 4조4천4백억원으로 추정되므로 총사업비는 44조 6400억원 정도임. ○ 국외에서는 2003년 스웨덴 스톡홀름 Sodra Lanken을 시작으로 지하 교통네트워크가 지속적으로 증가하고 있는 추세이며, A86 West Beltway, 보스턴 Big Dig, 마드리드 M-30, 말레이시아 쿠알라룸푸르 SMART, 싱가폴 KPE Road Tunnel, 일본 중앙환상신주쿠선, 일본 동경의 시나가와선, 미국 시애틀 Alaskan Way 등이 운영 중 또는 시공 중에 있음. 향후 다양한 지하도로 사업이 해외에서도 추진될 것으로 예상되는 여건을 고려할 때 본 연구의 성과를 활용하여 해외시장 진출이 가능할 것으로 예상됨. ○ 도심지 교통정체를 해소하고 지상의 쾌적한 녹지공간을 확보함으로서, 새로운 형식의 SOC시설물 건설이 사회, 문화적 요구에 대응하고 국가의 정책적 목표를 달성함. ○ 복합기능의 복층터널 도입으로 도심지 홍수방어능력 향상과 함께 교통량 분산 효과가 동시에 달성되어 건설예산에 중복투자를 방지하고, 국민의 세금을 효율적으로 사용함. ○ 대심도 복층터널의 건설에 있어 국내 독자적인 시공기술이 개발됨으로서 국가위상 증진이 기대되며, 건설장비 분야와 신소재 분야 등 관련 산업의 동반 성장이 기대됨. ○ 복층터널 최적 환기설계기법의 개발로 인하여, 운영 시 최소 환기운영비의 산출이 가능하게 되고, 이를 활용하여 일반터널의 운영비 절감에 상당한 효과를 기대할 수 있음. ○ 본 연구의 기술개발을 통해 국내외적으로 추진되고 있는 장대도로터널 및 지하도로의 신규 방재시설 적용을 통하여 기존 터널의 방재시설인 물분무 설비

	대비 20% 이상 운영비의 절감이 예상됨. [활용방안] ○ 복층터널 최적설계법은 매뉴얼화 되어 도심지 지하도로 건설 시 경제적인 터널건설에 기여할 것으로 예상되며, 복층터널 중간 슬래브에 대한 설계법의 체계화가 가능하므로 유사한 구조물에 활용이 기대됨. ○ 개발된 입체표지판 및 친환경 조명시스템은 지하도로 및 일반도로터널에서 설계 오류을 줄이고 시공성을 향상 시킬 것으로 기대됨. ○ 대단면 복층터널의 생애전주기 정보화 및 안정성 통합 관리 기술은 홍콩, 터키, 노르웨이 등 복층터널을 활발하게 개발하고 있는 국가를 대상으로 시장 진출이 가능할 것으로 기대되며, 기존의 운영 및 신규 시공 중인 여러 복층터널 현장에 기술적용이 가능할 것으로 판단됨. ○ 복층터널 확폭부에 대한 독자적인 시공 및 보강기술 개발로 엔지니어링 설계 분야의 국제적인 기술력 확보와 국가기술 경쟁력 확립에 기여할 수 있을 것으로 판단됨. ○ 복층터널용으로 개발된 수직구 건설공법은 복층터널 뿐만 아니라 증가하고 있는 도심지 공사에 적용이 가능하며, 수직구 구조물을 급속으로 시공하는 기술이 보편화 될 것으로 기대됨. ○ 소형화 버력 급속처리방법은 복층터널뿐만 아니라 대단면 및 도심지 공사에 적용되어 점차 확대·보급될 것으로 예상됨. ○ 네트워크형 복층터널의 안전한 운영을 위한 환기설계 기법을 개발하고 이에 대한 환기설계지침을 제공함으로써, 향후 국내에서 복층터널 시공 시 해당터널의 설계조건에 부합하는 환기기법에 대한 사전연구결과를 제공할 수 있음. 제공된 환기설계기법을 바탕으로 시공 시 효과적 설계가 가능하고, 이로 인하여 향후 운영 시 이용자들로 하여금 안전한 이용이 가능할 것으로 기대됨. ○ 복층터널 오염물질 외부배출 영향을 최소화하는 다양한 방안 및 기준을 제시함으로써, 향후 대심도 복층터널 건설 시 해당 터널 특성에 맞는 오염물질 저감 시스템 선정 및 적정 용량 적용에 기준이 되며, 효율적인 설계 진행에 기여할 것으로 전망됨. ○ 본 연구과제에서 도출된 화재진압기술은 장대도로터널 및 지하도로와 같이 화재안전위험도가 높은 건설 분야의 방재설계기술 개발에 활용이 가능함.

국문핵심어 (5개 이내)	대심도	지하공간	복층터널	중간슬래브	화재안전

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 1
2. 연구수행내용 및 성과 ····· 21
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 69
4. 연구개발성과의 활용 계획 등 ····· 100

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발 목표

(1) 최종 목표

○ 연구단 총괄

– 본 과제의 최종목표는 도심지 대심도에 건설되는 다목적 복층터널을 건설하고 운용하는데 필요한 설계 및 시공, 환기 및 화재안전의 핵심 기술을 국내기술로 확보하는 것임.

– 이를 위하여 ① 네트워크 지하도로망 구축 및 다목적 기능의 복층터널 설계 기술 확보, ② 확폭, 분기부 등을 효율적으로 구축하고 경제적이고 최적화된 복층터널을 시공하는 기술을 확보, ③ 지하 네트워크의 환기 및 화재 안전에 대응하고, 복층터널 구조체의 손상평가 기술 개발을 목표로 함.

– 본 연구개발을 통해서 기존의 병렬터널 대비 공사비 15% 절감과 이용자의 100% 안전 확보가 가능한 복층터널 설계 및 시공기술과 환기 및 화재안전의 핵심기술을 확보하고자 함. 또한 향후 복층터널 및 고도화된 다목적 시설의 건설수요가 증가할 것으로 예상되므로 현재 60%에 머물러 있는 관련 기술에 대한 국내 설계 및 시공기술 수준을 선진국 대비 90%까지(연구종료 후 기준) 확보하고자 함.

– 본 과제에서 목표로 하는 연구개발 성과물은 심도 40m 이상, 길이 15km 이상의 네트워크 복층형 지하도로 패키지 기술이며 기술개발을 통해 광역 대도시권역의 지상교통 및 환경부담을 최소화하고 지상의 녹색공간을 시민에게 환원하는 미래형 신공간 창출에 기여할 수 있는 기술임.

– 이상과 같은 연구 목표를 실현하기 위하여 구체적으로 다음과 같은 세부 연구 내용을 구성하여 연구를 수행함.

◦ **[복층터널 최적화 설계기술]** 복층터널 분기부 기하구조, 경제성 및 안정성을 갖춘 특수 중간슬래브 구조체 설계 등 최적단면 설계 가이드라인, 공간 활용성을 향상시킬 수 있는 방수로 겸용의 다목적 복층터널 설계 기술 개발

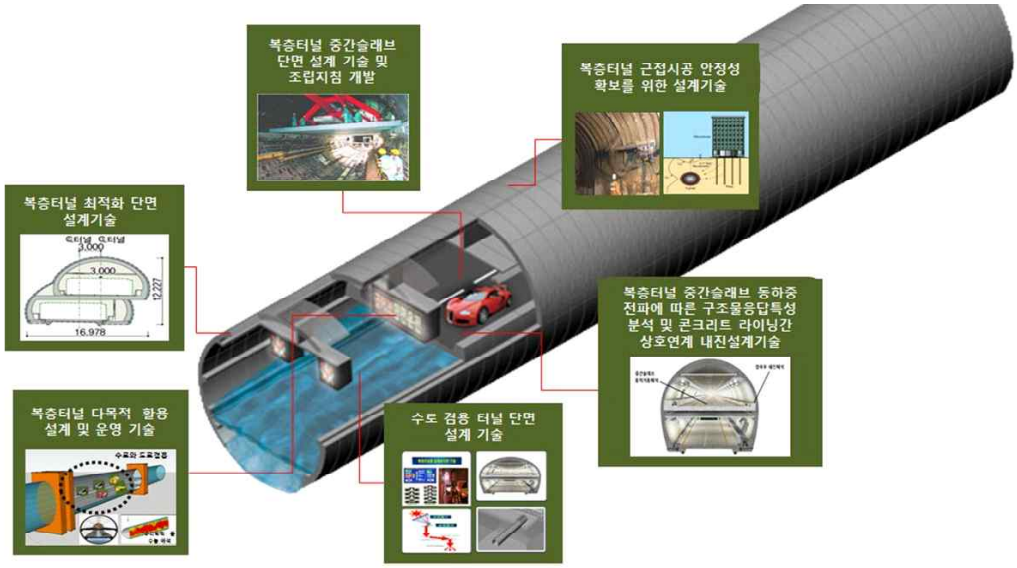
◦ **[효율적인 복층터널 시공기술]** 종래의 일반적인 터널과 달리 복층구조의 특수성과 지하도로의 네트워크성으로 인한 분·합류부/중간슬래브 등의 특수 시공기술 개발

◦ **[복층터널 환기/화재안전 기술]** 연장이 길며 슬래브로 단면이 구분된 복층터널의 특성을 고려한 운영 중 최적 환기 시스템/오염물질 확산 방지 시스템 개발과 더불어, 화재 사고발생 시에 이용자의 안전을 확보하기 위한 화재 확산제어/내화확보 기술 개발



■ 1세부

○ 국내 기술력 확보 및 국가 정책에 부합되는 대심도 복층터널 건설을 위한 설계기술의 확보를 목표로 하며, 이를 위하여 병설터널보다 경제적인 복층터널 설계법을 개발하고, 주변 지역의 지반침하 등의 영향을 최소화 하면서, 분기부 등의 적용가능 한 설계법을 개발함.



[제1요소기술] 복층터널 최적화 단면 설계기술

○ 복층터널 내부구조, 내부 네트워크의 국내 설계사례가 없어 설계 시 경제성과 안정성을 고려한 복층터널 분기구간 계획과 복층터널의 내·외적 안정성을 확보하고 다목적 활용 방안에 대한 최적화 단면 설계 방안 마련

– 터널 단면 설계 시 선형조건, 차종, 건축한계, 비상사고 시 유지관리용 접근성 등을 고려하여 다양한 터널단면 형상 도출 모색

– 관련 기술력과 경험을 보유하고 있는 관계기관과의 협력 체계 구축 및 기술도입·기술자문을 적극적으로 추진하여 분기구간의 기하구조 및 최적의 복층단면 설계안 도출방안 모색

○ 지하 IC/JCT 연결로 유출입 접속부 및 노즈부 설계기술 개발과 상하층 분리구조 설계 및 초대형 단면 분리 설계기술 개발

– 모형실험의 수치해석 적 검증과 Parametric Study를 통한 복층터널 지하IC/JCT 연결로 접속부의 굴착, 보강 설계방안 수립

[제2요소기술] 복층터널 구조체 설계 및 성능평가 기술

○ 대심도 복층터널의 차량통행을 위한 중간슬래브 단면 설계기술 및 프리캐스트 중간슬래브 조립지침을 개발

– 복층터널 중간슬래브의 최적 단면을 설계할 수 있는 기술을 개발하고 슬래브간의 접합부를 연결하는 방안을 개발

- 복층터널 중간슬래브와 콘크리트 라이닝간의 상호 연계를 위한 구조체 설계기술을 개발
- 복층터널 라이닝 강결부의 내하력을 평가하여 안전성을 확보하고 프리캐스트 중간슬래브 의 조립을 위한 지침을 개발

○ 슬래브 동하중 전파에 따른 구조물 응답특성 분석
- 복층터널 중간슬래브를 통한 동적하중 전파에 따른 전체 터널구조물 응답해석기술을 개발

○ 중간슬래브 구조와 라이닝간의 상호 연계 내진설계
- 복층터널 중간슬래브 구조와 터널 콘크리트 라이닝간의 상호 연계 내진해석기술을 개발
- 복층터널 중간슬래브 구조와 터널 콘크리트 라이닝간의 상호 연계 내진설계기준 정립
- 중간슬래브-라이닝-지반의 상호작용을 고려한 내진설계기술 개발
- 실대형 진동대 시험 및 원심모형시험 수행 및 이를 이용한 동적해석 및 설계기술 개발

[제3요소기술] 복층터널 근접시공 안정성 확보를 위한 설계기술

○ 복층터널 근접시공 안정성 확보를 위한 설계기술 개발
- 도심지 근접시공 손상평가 기초연구
- 원심모형시험을 이용하여 복층터널 굴착 및 지하수 변동에 따른 침하분석
- 지중구조물 근접시공 손상평가
- 지상구조물 근접시공 손상평가
- 근접시공에 따른 지상구조물 안전도 평가 지침(안)

[제4요소기술] 복층터널 내부시설 운전자 친화 설계 기술개발 및 가상 프로젝트

○ 복층터널 내부시설 운전자 친화 설계 기술개발 및 가상 프로젝트
- 장경간화 및 낮은 터널높이의 조건에서 운전자의 사전 사고 예방을 도모하기 위하여 입체 표지판 및 친환경 태양광을 이용한 고효율 조명시스템을 개발
- 입체 표지판 및 조명시스템을 통하여 평시 운행 시 차량 탑승자가 대피위치를 파악할 수 있고 화재나 교통사고 시 신속한 대피가 가능한 설계 기술 방안을 제시하는 것을 목표로 함
- 성능목표 : 입체표지판 시인성 20% 이상 향상, 조명시스템 집광효율 30% 향상 및 도광부 직경 300mm 이하 제작, 설계/시공/유지관리 매뉴얼
- 설정근거 : 복층터널만의 특징(낮은 터널 높이, 장대터널 등)을 고려한 친환경 조명시스템을 이용하여 운전자에게 주행안정감 제공, 운전자에게 터널 내 정보를 효율적으로 전달할 수 있는 표지문자 설계연구 필요

○ 복층터널 내부 타일 대체용 친환경 불연도료의 개발
- 정량적인목표 : 복층터널 화재강도에 견딜수 있는 친환경 불연도료
  1) 중금속 총량 0.05무게%(1000 mg/kg) 이하
  2) 1000℃ 온도에서 유독가스 무배출

○ 복층터널 가상프로젝트에 대한 기본설계

– 각 기관에서 수행된 연구결과를 분석하여 가상의 site 선정 및 설계를 수행하고 본 과제의 연구성과 적용성과 기술적 융합성을 파악하여 향후 타당성 분석의 도구로 활용

○ 복층터널 가상프로젝트에 대한 설계 및 시공 시뮬레이션수행

– 각 기관에서 수행된 연구결과를 참고하여 가상의 공간을 설계 및 복층 터널의 시공 시뮬레이션을 수행하여 본연구성과의 적용성과 기술적 융합성을 파악하여 향후 타당성 분석을 위한 도구로 활용

[제5요소기술] 복층터널 다목적 활용 설계 및 운영기술

○ 수로겸용 복층터널의 수방기법 및 통수능 검토 기술

○ 다목적 복층터널의 복원력(resilience) 증진기술 개발

– 터널 내부 작용수압 저감 및 부력 방지 설계기준 및 복원력 저감요인과 회복대책을 반영한 복원력 평가 지표안 제시

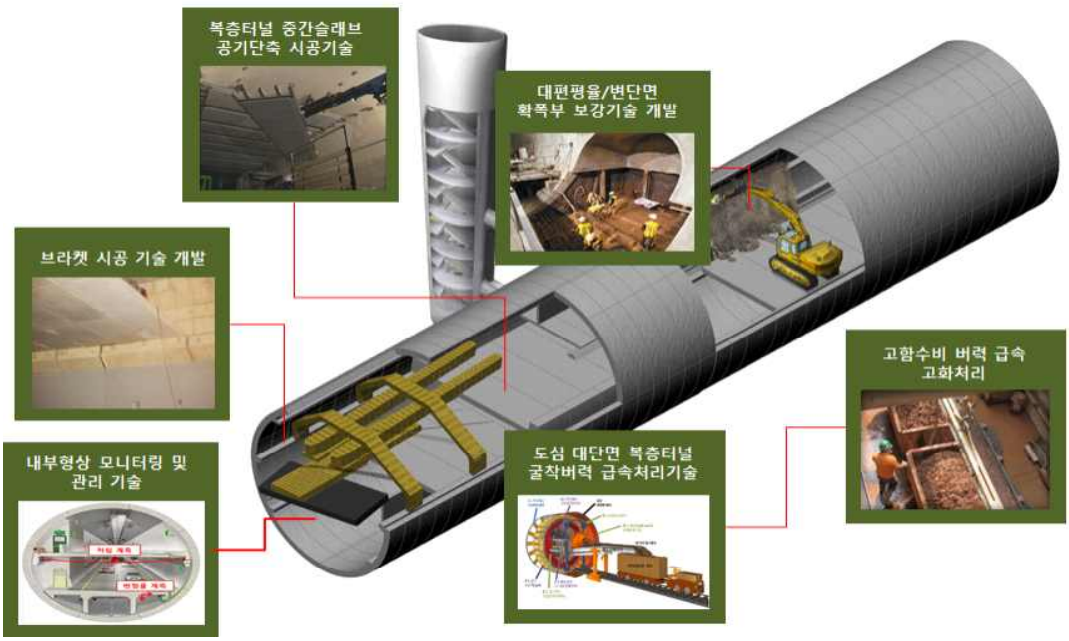
– 다목적 복층터널의 반복 기능전환에 따른 복원력 저하를 방지하여 설계수명기간동안 성능을 보장하는 기술을 개발

○ 조합설계기준 및 유지관리 가이드라인

■ 2세부

○ 국제적으로 경쟁력을 갖춘 복층터널 건설을 위한 굴착, 보강 등의 차별화된 기술을 개발하여 도심지 지하도로의 안전한 건설로 미래형 복층터널 시공기술 개발을 목표로 함

○ 대심도 복층터널의 경제적이고 안전한 시공기술 개발하고, 시공 및 운영 중 안정성 확보와 구조물의 안정성 확보를 위한 고유 핵심기술 개발



○ 대심도 복층터널에서 타 구조물과의 연결을 위해 시공되는 기존 터널의 확폭 및 분기부에 대한 굴착기술 개발을 목표로 확폭·분기부 굴착장비 설계기술과 굴착장비 제작기술

을 개발하고자 함

- 확폭·분기부 시공을 위한 암석강도 80MPa이하 대응 커팅헤드 어태치먼트 설계 기술
- 확폭·분기부 시공을 위한 셔블계 굴착기 어태치먼트 제작 기술
- 셔블계 굴착기와 커팅헤드 어태치먼트 연결 및 제어 기술

○ TBM 장비를 이용한 터널 시공 시 본선터널 내부에 피난연락갱, 접속부, 확폭부 등을 설치하기 위하여 강재 세그먼트를 사용하고 있으며, 이러한 강재세그먼트는 제작 단가가 매우 높을 뿐만 아니라, 부대 비용과 공사기간이 많이 소요되는 작업임. 따라서 TBM 장비를 이용한 터널시공시 확폭·분기부 세그먼트의 시공/설계 단순화를 위한 세그먼트를 개발

- 확폭·분기부 시공을 위한 특수 콘크리트 세그먼트
- 분기·확폭 시공을 위한 임시 구조물의 형태 및 임시구조물과 세그먼트 연결 방법

○ 대심도 공간에서 지하도로 간의 네트워크 구축을 위한 접속부, 지상도로와의 진 · 출입시설 등 협소 공간에 대응하고, 고수압의 지하수 조건에서 사용 가능한 장비 및 재료의 개발이 필요함

- 제한적인 공간에서 시공을 위해 기존 믹서의 50%이하 용적의 그라우트 소형화기술 및 믹서개발
- 대심도 · 고수압 조건에 대응하기 위한 1일 강도 21MPa이상의 급결형 고강도 그라우트 재료의 개발

○ 터널의 진출입시설 등 확폭이 필요한 공사의 안전성 확보를 위해 대평평율/변단면 확폭부 보강기술을 개발하여 복층터널 구조물의 안정성을 확보하고자 함

- 확폭/변단면 구간에 대한 사전보강으로 터널의 확폭 공사중 및 운행중 복층터널 구조물 자체의 안정성 확보 기술 개발
- 확폭/변단면 구간의 단면 형상에 따른 보강 방안 검증을 통한 변단면 확폭 구간에 대한 최적 보강 기술 개발
- 공사중 및 운영중 안정성 확보를 위한 최적 방법에 대한 시공방안 및 보강범위 선정을 위한 기술 개발

○ 복층터널의 중간슬래브 구축에 있어서 공기를 단축하기 위해 제작기술과 가설기술 및 장비를 개발하여 기존의 크레인을 이용한 가설방식에 비해 공정속도를 2배 이상 향상시킬 수 있는 시공기술 및 장비를 개발하고자 함

- 중간슬래브 제작기술은 운반조건에 따른 시공성을 고려한 현장 및 공장제작기술을 개발
- 위치별(환기용/도로용/수로용) 중간슬래브의 가설기술을 개발하고, 시공속도향상을 위한 가설장비의 개발
- 개발된 장비를 고려한 공정계획 작성하고, 현장여건과 시공속도향상을 고려한 가설장비의 시제품을 제작개발

○ 슬래브와 터널 구조물을 연결해 주는 브라켓은 터널 본체의 시공법에 따라서 일체화 또는 분리시공에 따른 시공성이 고려된 확실한 부재력 전달이 가능한 구조로 개발될 것이며, 특히 슬래브와 브라켓의 연결방식, 브라켓이 설치되는 터널 라이닝의 보강방식 등을 성능시험을 통해서 개발하고자 함

- 현장제작 및 부착형 브라켓 시공기술의 개발

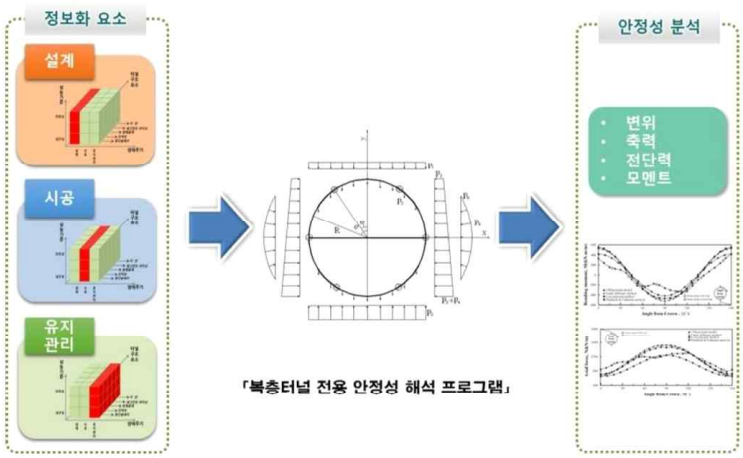
- 브라켓과 슬래브 연결조건에 다른 성능 및 시공기술을 시작품 제작과 성능시험을 통해서 개발
- Test-bed를 이용한 최적화된 브라켓 시공기술을 시연/성능 확보

○ 복층터널 슬래브를 고려한 고성능 복합 터널 라이닝 기술 개발에서는 복층터널을 위한 슬래브를 설치하기 위해 경제적이고 안정성이 확보되는 브라켓 개발을 목표로 하고, 슬래브 설치 방법에 따른 라이닝 거동 분석과 이를 통한 보강 방안 및 복합 고성능 라이닝의 개발을 목표로 함

○ 복층터널 지중 분기부 및 합류부에 발생되는 초근접(0.1D~0.2D) 필라부 및 본선터널과 분기터널의 위치관계에 따라 발생되는 지반구조상 취약부, 그리고 복층터널 유출입부 등 특수부 안정성 확보 기술 개발하고자 함

○ 대심도 복층터널의 시공/공용 중 내부 슬라브 처짐 및 변형률을 실시간 계측할 수 있는 내부형상 모니터링 기법 및 이를 이용한 내부형상 관리 기술 개발

○ 대단면 복층터널의 정보화를 위한 BIM 플랫폼과 FEM 솔버를 통합한 복층터널의 안정성 해석 프로그램 개발 및 유지관리 기법 개발을 통한 대단면 복층터널의 생애전주기 정보화 및 안정성 통합 관리 기술 개발하고자 함.(그림 참조, 대단면 복층터널의 생애전주기 정보화 및 안정성 통합 관리 기술 개발 예시)



<대단면 복층터널의 생애전주기 정보화 및 안정성 통합 관리 기술 개발 예시>

○ 공간(분기구, 본선, 진입구)과 구조(라이닝, 중간슬래브) 담당 과제 연구진으로부터 ①상시운영중 ②화재 및 비상 발생시 발생 될 수 있는 안정성 및 유지관리 내용을 취합하여 유지관리 가이드라인 총괄 작성 및 복층터널 성능중심의 평가기술 항목 (변상, 안전성, 내구성, 기능성) 개발

○ Test-bed 적용을 통한 연구단 개발 기술의 현장 적용성 검증 및 보완을 통해 개발 기술의 완성도를 높이고자 함
- 복층터널 시공 용 고강도 그라우트 주입 성능 검증
- Test-bed 내 슬래브 브라켓 (천공, 보강재, 슬립폼) 제작
- 대심도 복층터널 연결용 수직구 Test-bed 내 시험



<TestBed 예정 개념도 (한국건설기술연구원 SOC실증센터 내 위치)>

○ 수직구 벽체 구조물 1일 상승속도가 4m이상 가능한 히팅 슬립폼장치 개발

○ 수직구 내부 SLAB 및 계단, 브라켓 조립공법 개발

○ 도심 대심도 수직구 작업자 운송장치 개발

■ 3세부

○ 본 과제의 최종목표는 안전하고 쾌적한 대심도 복층터널 구축을 위한 환기 및 화재안전 기술 확보임. 대도심의 효율적 활용을 위한 프랑스 A86, 다목적 활용도를 추구한 말레이시아 스마트 터널, 중국의 도로와 Metro system을 결합 복층터널 등 대심도 복층터널 건설 시장이 확대되어감에 따라 이에 따른 환기 및 화재안전 설계 핵심 기술력 확보는 중요한 연구개발분야로 대두되고 있음

○ 이에 본 과제에서는 1) 복층터널 네트워크형 환기설계 및 해석기술개발, 2) 복층터널 오염물질 확산 예측 및 외부 배출 방지 기술, 3) 복층터널 화재확산 제어 및 내화 성능 향상 기술, 4) 복층터널 화재 안전평가 및 관리시스템 구축등의 4개의 핵심 기술 개발을 목표로 연구를 진행함

[제1요소기술] 복층 네트워크형 터널의 네트워크형 환기 설계 및 해석 기술

○ 복층 네크워크형 터널의 최적 환기설계를 위한 인자를 도출하고 다양한 사례연구 및 Scaled model 실험을 통한 적용성을 검토하고, 이를 바탕으로 환기설계 지침 마련

– 국외의 복층터널 환기설계사례를 조사하고 분석하여 국내연구에 부합하는 환기설계인자를 결정

– 복층터널 환기 설계 인자에 대한 설계치를 도출하고 적용성 검토를 위하여 Scaled model 실험을 통해 중요한 환기설계 인자 결정

– 복층터널 분기부 및 접속부에서의 기류예측을 위한 수치해석 및 Scaled model 실험을 통한 적용성 검토

– 장대터널의 경우 횡류식 환기방법이 효과적임에 따라서 횡류식 환기방법 적용을 위한 수직갱의 설계 및 송풍기의 경제적 활용방안 기술개발

○ 환기설계기법과 본 연구를 통해 개발된 소프트웨어를 활용한 실제 터널내 적용성 검토

○ 네트워크형 복층터널 환기시스템 성능을 예측하고 적정한 설계 사양을 공학적으로 해석할 수 있는 알고리즘 및 소프트웨어를 개발

[제2요소기술] 복층터널내 오염물질 제어기술 및 외부 배출 방지 기술

○ 복층터널의 환기량 및 환기시스템 설계에 가장 기본이 되는 차종별 오염물질 배출량 기준 제시

– 복층터널에 운행될 것으로 예상되는 소형차량에 대해 정속주행시 주행속도별 오염물질 배출량을 실측

– 터널내 차종별 오염물질 배출량산정모델

– 복층터널의 오염물질별 한계농도 제어방안 구축

○ 거대화 될 가능성이 높은 환기기 운전동력을 최소화하기 위하여 환기기 운전제어로직 개발

– 복층터널에 적용 가능한 환기방식에 대한 환기기 운전단계 최적화 방안 수립

– 자동제어 로직 평가 방안 구축

– 운전동력 최소화를 위한 자동제어 알고리즘 개발

○ 오염물질 저감 시스템 개발
본 과업에서는 오염물질 저감 시스템을 자체 개발하는 것보다는 환기탑 오염 영향을 조사하고 주변환경에 미치는 영향을 분석하여 시스템 적용의 타당성을 확보하고 국내 및 국외 시장조사를 통하여 신기술 도입에 집중할 계획임

– 터널 오염물질 저감 시스템 종류 및 설치 사례 조사

– 터널 오염물질 저감 시스템별 성능 및 적용성 분석

– 설정 목표값을 만족하는 용량 적용을 위한 경제성 및 시공성 분석

– 터널 오염물질 저감 시스템의 적정 용량 및 설치 방안 도출

○ 환기탑 최적화 방안
환기탑 구조에 따른 주변 환경 영향 분석을 통하여 환기탑 설치 방안 연구를 수행할 계획임

– 환기탑 풍속에 따른 영향 검토

– 환기탑 배출 방향에 따른 영향 검토

– 환기탑 높이에 따른 영향 검토

– 오염물질 주변 환경 영향 최소화를 위한 환기탑 적용 방안 도출

○ 복층터널 환기성능 개선을 위한 대배기구 포트 최적화 기술 개발
대도심에 건설되는 횡류식 환기방식이 적용된 터널에 적합한 급배기 포트의 최적화를 위해 터널 교통량 및 급배기 풍량 등을 통해 차도와 풍도내의 압력차를 기반으로 포트 개도율을 최적화할 수 있는 프로그램을 개발할 계획임

- 횡류식 환기방식 개도율 조정에 관한 기준조사
- 개도율 최적화 프로그램 개발
- 개도율 계산 프로그램 검증
- 실제 운영중인 터널의 댐퍼 개도율을 대배기구 포트 프로그램과 현장 측정한 댐퍼 개도율을 비교하여 오차범위를 분석

[제3요소기술] 복층터널 화재확산 제어 및 내화 성능 향상 기술

○ 안전한 복층터널 구현을 위하여 화재 및 연기확산을 제어할 수 있는 기술을 개발하고, 화재시 복층터널의 중간슬래브 등 구조부재의 내화 성능을 확보할 수 있는 방안과 화재 후 손상 평가/보수 보강 기술을 제시함으로써 복층터널의 화재 안전성 향상 기술 개발을 최종 목표함

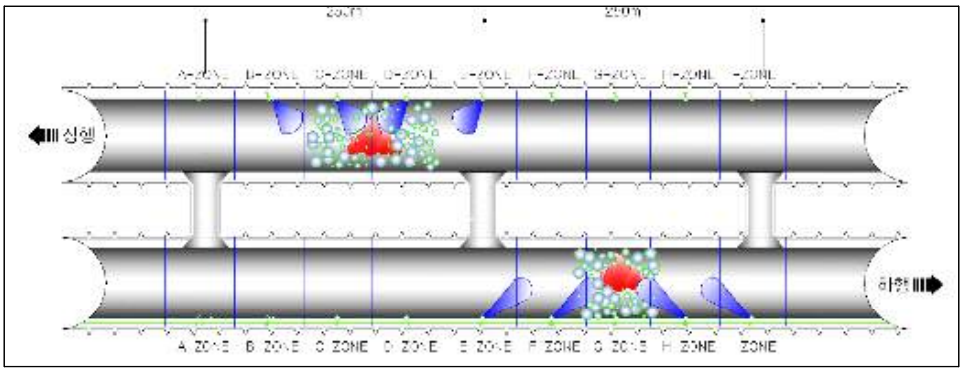
- 실규모 자동차 연소 실험을 통한 설계화재강도 제시
- 화재시 연기 배출 향상을 위한 대배기구 시스템 및 배연 매뉴얼 작성
- 복층터널 중간슬래브 등 내화성능 확보 기술 개발
- 복층터널 중간슬래브 화재 후 손상 평가기술 및 보수/보강 기술 개발

○ 복층터널에 차량화재 발생시 화재 지역에 상하좌우 구동이 가능하고 원격 조종에 따라 초기에 화재진압이 가능한 원격 자동소화설비를 개발하여 터널내 화재안전성을 높이고, 도로터널 및 지하도로의 기존 물 분무 시설대비 경제성/초기화재진압능력/유지관리 향상 등의 우수성이 확보된 방재시설개발을 최종목표로 설정함

- 화재진압 장치제작 및 성능검증
- 원격 자동소화설비 제작 및 성능검증
- 원격 자동소화설비 매뉴얼 개발



[원격 자동소화설비 작동 개념도]



[도로터널 및 지하도로 원격 자동소화설비 구간별 설치 및 작동방안]

		
1단계 : 차량 사고 발생	2단계 : 화재감지 후 소화 설비 노즐부 회전	3단계 : 화재방향 분사 및 초기화재 진압

[단계별 원격 자동소화설비 작동 시나리오 안]

○ 네트워크형 복층터널에서 화재사고 발생시 인명사고와 물적 피해를 최소화하기 위해 화재 초기에 연기 확산 속도를 지연시켜 줄 수 있는 장치 및 시스템을 개발

[제4요소기술] 복층터널 화재안전 평가 및 관리시스템 구축

○ 대심도 복층터널 위험요인 및 터널 사고결과분석을 통한 화재 시나리오 정립

○ 소화설비 적용가능 (정량적)안전성 평가 방법론 제시

○ 대심도 복층터널 안전성 확보를 위한 운영방안 수립

○ 터널내부에 IEEE802.15.1(Bluetooth 무선통신 기술) 기반의 무선 network을 구축하여 터널 내부에서 화재 발생시, 스마트폰에 장착된 Bluetooth chip과 연동하는 어플(application)을 개발함으로서 터널에 설치된 피난 대피처까지 운전자와 동승자를 안내함은 물론, 터널내부 및 피난대피소에 대피한 조난자가 있음을 외부로 지속적으로 알림으로서 사고 후에도 안전하게 구출될 수 있는 재난 대처기술 개발임

○ WPAN망을 통한 감시 시스템 구축으로 별도의 module없이 스마트폰 기본사양에 의한 무선측위가 가능한 스마트 피난경보 시스템 개발

○ 복층터널 특성 반영 영상유고감지시스템 개발을 통하여 기존 터널내 범용 CCTV 기반의 감시방식 대비, 복층터널에서 최적의 성능을 발휘할 수 있는 4차산업혁명 지능정보기술(ICT)시대, 사물인터넷 IoT 감지센서 설비인 복층터널 영상유고감지시스템의 시제품 개발을 앞당겨 상용화함.

○ End Product은 다음과 같음

- IoT 영상유고감지센서 (하드웨어, 가칭 "VIT-100")
- 영상유고감지 알고리즘 (VIT-100 탑재형 소프트웨어) ,영상처리&컴퓨터 비전 기술 등을 이용한 대심도 복층터널 특성(장거리, 낮은층고 등) 반영
- IP Surveillance(감시) 인프라 (시스템 : HW(워크스테이션) + 서버탑재형 SW)

나. 연구개발의 개요

○ 연구개발과제의 설명

- 대도시권의 혁신적인 지하 네트워크 구축을 위한 [대심도 복층터널 설계 및 시공기술 개발]은 지상의 교통, 환경 및 에너지 부하를 줄이고, 쾌적하고 안전한 도시건설에 필요한 기술임.
- 서울 및 수도권에서 교통 집중과 정체로 인하여 약 12.5조원/년의 경제적 손실이 발생(OECD 서울지역 정책보고서(2002))하고, 2031년에는 서울시에서만 약 16조원의 교통혼잡 비용이 발생할 것으로 예상(한국교통연구원 국가교통DB센터 통계자료)되고 있는 상황이므로 유럽 등 선진국과 같이 대심도 지하 네트워크 설계 및 시공기술의 확보가 시급한 실정임.
- 특히, 복층터널과 같은 신개념의 고도화된 다목적 시설의 건설수요에 선제적으로 대응하기 위하여 선진국 대비 60% 정도의 설계 및 시공기술 수준을 90%까지 확보하고자 함.
- 또한 도심터널의 대심도·장대화 추세가 반영된 교통 네트워크에서 안전을 확보할 수 있는 방안을 수립함과 동시에 친환경적인 최적 환기시스템 및 화재안전 기술을 확보할 수 있는 과제임.
- 국내 실정에 적합한 대심도 다목적 복층터널의 모델을 개발하고 체계화하고자 하며 이를 위해서 기존터널과 차별화된 복층터널 설계 및 건설기술뿐만 아니라 터널의 지하 분기부, 지상 유출입부 설계 및 시공기술, 복층터널의 다목적 활용(수로터널)※ 기술을 개발함.
  ※ 공간의 고정적인 분할사용이 아니라 공간의 순차적 전환사용이 가능한 다기능 터널(차로와 수로의 순차전환)을 의미한다.
- 특히, 교차로를 포함하는 대심도 장대 지하도로에서 이용자에게 쾌적한 환경을 제공하기 위한 환기시스템과 화재 시 안전을 확보할 수 있는 피난, 제연, 내화 등의 화재안전기술은 핵심선도 기술로 분류되고 있음.
- 최근 지하 인프라 시설에 대해서 국민이 느낄 수 있는 불안감을 해소하고 효율적이며 원활한 운용이 가능할 수 있도록 이용자 친화적인 설계 및 시공, 환기 및 화재안전의 핵심 기술을 확보함.
- 연구단 각 세부과제의 연구성과 공유 및 분석을 통해서 가상설계 시 융합할 수 있는 항목을 선정 하고 가상프로젝트를 수행하여 실용화가 가능한 가이드 성과물을 작성함.
- 본 연구개발을 통해서 이용자의 공간적 폐쇄감을 최소화하고 안전한 복층터널 구축이 가능한 기술을 제시함으로서 지하공간 개발에 대해서 긍정적인 사회적 공감대가 확산됨과 동시에 복합기능 인프라 건설기술이 해외로 진출할 수 있는 계기가 될 것으로 기대함.
- 이를 위해 ① 네트워크 지하도로망 구축 및 다목적 기능의 복층터널 설계 기술 ② 확폭, 분기부 등을 효율적으로 구축, 경제적이고 최적화된 복층터널을 시공하는 기술 ③ 지하 네트워크의 환기 및 화재 안전에 대응하고, 복층터널 구조체의 손상평가 기술 개발 등을 목표.

– 본 연구과제는 기존 병렬터널 대비 공사비 15% 절감과 이용자의 100% 안전확보가 가능한 기술개발 및 확보를 정량적 목표로 설정함.



< 대심도 복층터널 투시도(예시) >

○ 연구개발 단계

– [대심도 복층터널 설계 및 시공기술 개발(복층터널 연구단)] 과제는 다음과 같이 연구개발 단계를 계획하여 연구를 수행.

■ 1세부

– [복층터널 최적화 설계기술 개발]은 복층터널 최적화 단면 설계기술, 복층터널 구조체 설계 및 성능평가 기술, 복층터널 근접시공 안정성 확보를 위한 설계기술, 복층터널 내부시설 운전자 친화 설계 기술개발 및 가상 프로젝트, 복층터널 다목적 활용 설계 및 운영기술에 대한 연구를 수행함.

– 이론적 연구단계(TRL 1 / TRL 2)를 거쳐 실험실 및 유사환경에서의 성능평가(TRL 3 / TRL 4 / TRL 5 / TRL 6) 단계를 거쳐 4, 5차년도에 Test-bed를 추진함으로서 실제환경 시작품 데모 단계(TRL 7) 까지 목표로 함.

구분		표기	단계별 설명
기초연구 단계	TRL 1	■	[redacted]
	TRL 2	■	
실험 단계	TRL 3	■	
	TRL 4	■	
시작품 단계	TRL 5	■	
	TRL 6	■	
실용화 단계	TRL 7	■	
	TRL 8	□	
사업화 단계	TRL 9	□	

■ 2세부

- [효율적인 복층터널 시공기술 개발]은 복층터널 최적화 시공을 위한 굴착 기술, 복층터널 구조체 시공 기술·장비, 복층터널 취약 특수부 안정성 확보 및 모니터링, 도심 대심도 수직구의 친환경 시공, 도심 대단면 복층터널 고함수비 굴착버력 친환경 급속처리에 대한 연구를 수행함.
- 이론적 연구단계(TRL1 / TRL2)를 거쳐 실험실 및 유사환경에서의 성능평가(TRL3 / TRL4 / TRL5 / TRL6) 후 연구성과물의 Test-bed 적용을 통하여 실용화 및 성능시험 단계(TRL7)까지 도달하는 것을 목표로 함.

구분		표기	단계별 설명
기초연구 단계	TRL 1	■	
	TRL 2	■	
실험 단계	TRL 3	■	
	TRL 4	■	
시작품 단계	TRL 5	■	
	TRL 6	■	
실용화 단계	TRL 7	■	
	TRL 8	□	
사업화 단계	TRL 9	□	

■ 3세부

- [복층터널 환기 및 화재안전 설계 기술 개발]은 복층터널 안전 설계 및 운영을 위한 네트워크형 환기설계 및 해석기술, 내부 오염물질 확산 예측 및 외부 배출 방지, 화재확산 제어 및 내화 성능 향상 기술, 화재안전평가 및 관리시스템 구축에 대한 연구를 수행함.
- 이론 및 기술적 개념 정립과 실험적 증명단계(TRL1~4)를 거쳐 유사환경에서의 실물성능평가(TRL5~6) 후 연구성과물의 Test-bed 적용을 통하여 시제품 설치 및 성능시험 단계(TRL7~8)까지 도달하는 것을 목표로 함.

구분		표기	단계별 설명
기초연구 단계	TRL 1	■	
	TRL 2	■	
실험 단계	TRL 3	■	
	TRL 4	■	
시작품 단계	TRL 5	■	
	TRL 6	■	
실용화 단계	TRL 7	■	
	TRL 8	■	
사업화 단계	TRL 9	□	

○ 최종목표의 성격 및 설정근거

■ 1세부 : 복층터널 최적화 설계기술 개발

- **복층터널 분기구간 기하구조 및 최적화단면 설계기술**은 지하 IC/JCT 연결로 유출입 접속부 및 노즈부 설계기술, 상하층 분리 구조설계 및 초대형 단면 분리 설계기술, 공간활용 극대화를 위한 복층터널의 최적단면 설계기술 등이 최종성과물로 제시될 것임. 이를 위하여 다수의 터널 설계경험과 노하우를 가지고 있는 전문연구자들로 연구진 구성

- **분기구간 복층터널의 안정성 평가 및 굴착설계 기술**은 지하 IC/JCT 연결로 분기구간 접속부의 최적 굴착 설계방안 수립을 목적으로 하며, 이를 위해 국내외 유사사례 분석을 통한 적절한 계획 하에 축소모형실험과 해석적 parametric study를 통하여 분기구간 복층터널의 규모와 형상, 지반조건 등에 따른 터널 안정성을 평가하고 최적의 굴착 및 보강설계 방안을 제시하고자 함

- **복층터널 중간슬래브 단면 설계기술 및 조립지침**은 복층터널 내부에 시공되는 차량통행을 위한 중간슬래브 및 이를 지지하는 라이닝 강결부 등의 구조체에 대하여 중간슬래브의 구조적 안전성과 처짐, 소음 등의 사용성, 유지보수에 따른 두께의 변화 등을 고려한 최적설계 및 성능평가 기술을 개발하는 것을 목표로 하며 복층터널 중간슬래브 설계기준(안) 및 조립지침(안)을 최종성과물로 제시될 예정임.

- **슬래브 동하중 전파에 따른 구조물 응답특성 분석**은 복층터널 내부에 시공되는 차량통행을 위한 중간슬래브 및 슬래브를 지지하는 라이닝 강결부 등의 구조체에 대한 동적해석 등을 목표로 하며 이를 위한 실내시험을 수행할 예정임. 그리고 복층터널 실내시험 적용 절차서(안)가 최종성과물로 제시될 예정임.

- **중간슬래브 구조와 라이닝간의 상호 연계 내진설계**는 복층터널 내부에 시공되는 차량통행을 위한 중간슬래브 및 슬래브를 지지하는 라이닝 강결부 등의 구조체에 대한 내진설계기술 개발을 목표로 하며 이를 위한 실내시험을 수행할 예정임. 최종성과물로는 내진설계기준(안)이 제시될 예정임.

- **도심권역 특성에 맞는 맞춤형 복층터널 지보/보강 설계기술**은 도심지 복층터널 건설 시 다층지반, 높은 지하수위, 주변 건물 등이 산재해 있는 도심지 터널의 특성에 적합한 복층터널의 지보/보강 방안(공법·기법)을 제시하고 외부 실무전문가를 위촉하여 연구를 수행할 예정임

- **대단면 복층터널의 근접시공 안전도 평가기술**은 시공단계와 지하수 변동에 따른 지반거동을 평가하기 위하여 실내모형 시험 장치제작(시험장치, 시험법) 그리고 터널굴착과 지하수 영향에 따른 지반거동 평가(공법·기법)가 성과물로 제시될 예정임. 또한 대단면 굴착에 따른 인접구조물 기초의 안정성을 판단할 수 있는 설계 차트(공법·기법) 그리고 구조물의 손

상을 평가 차트 및 도구 개발(공법 · 기법)이 성과물로 제시될 예정임. 이를 바탕으로 인접 구조물 평가 프로세스와 지침(안)(정책제도, 시스템)가 최종 성과물로 제시될 것임. 이를 위해 다양한 터널 수행프로젝트와 모형 시험장치 제작 실적이 있는 한양대학교 연구진과 대흥미래기술이 연구를 주관하며, 그 이외에 도심지 터널과 근접시공 관련 실무 전문가를 위촉하여 연구를 수행할 예정임

- **복층터널 단면 최적 표지 및 조명시스템 개발**은,
  - 복층터널의 경우 터널내 표지판의 정보인식 및 상황판단 할 수 있는 시간이 짧기 때문에 기존의 터널용 표지판을 개선하여 먼거리 에서도 시인성을 확보 할 수 있는 입체 표지 방안 계획 제작하여 실험분석을 통한 최종목표의 세부방안으로 설정함
  - 입체표지판의 경우, Test-bed 현장설치를 통해 운전자가 실제로 어느정도 거리에서 표지판을 파악할 수 있는 것에 거리분석 및 인식의 정도가 가장 중요성에 대한 성능검증을 하기위해 최종목표의 세부방안으로 설정함
  - 복층터널용 입체 표시판의 설계/시공/유지관리 매뉴얼을 제시함으로서 향후 국내외적으로 추진될 복층터널의 입체표지판의 적용활성화를 위한 지침서 및 제도적인 보완방안을 제시하고자 최종목표의 세부방안으로 설정함
  - 복층터널의 경우 터널의 시공경제성을 확보하기 위해 최소 터널내경으로 시설한계가 낮고 지하차도 형태의 사각단면으로 입출구부가 형성됨으로 좁은공간에서 태양광 조사를 위한 장거리 산광 시스템 연구개발과 시작품 제작 및 실험을 통한 성능검증으로 제시하고자 최종목표의 세부방안으로 설정함
  - 복층터널용 낮은 시설한계에 적용 가능한 조명시스템의 설계/시공/유지관리 매뉴얼을 제시함으로서 향후 국내외적으로 추진될 복층터널을 위한 지침서 및 제도적인 보완방안을 제시하고자 최종목표의 세부방안으로 설정함

- **복층터널 내부 타일 대체용 친환경 불연도료의 개발**은,
  - 터널에만 제한적으로 도장을 적용할 수 있는 터널 내장재 설치기준을 장대터널에도 도장을 적용할 수 있도록 준불연 이상의 도장재로 기준이 개선되고, 타일에 비해 상대적으로 경제적인 도장을 더 널리 사용할 수 있어 건설비용의 절감 효과도 매우 클 것이기에 이에 적합한 친환경 불연도료 개발을 설정함

- **복층터널 가상프로젝트에 대한 설계 및 시공 시뮬레이션**은,
  - 기본설계는 복층터널 설계시 기초가 되는 설계의 중요 단계로서 제한된 조사수행에 의하여 지반조건이 결정 되므로 건설될 터널의 안정성 확보을 위한 단면형상, 굴착공법, 지보설계 및 터널 구조체인 라이닝 설계에 대한 정량적인 가상 설계가 요구됨. 또한 터널건설 후 지하수의 유출이 예상되므로 이에 대한 처리가 필요하여 배수 및 방수시스템에 대한 설계가 요구되므로 세부항목으로 선정함
  - 가상설계 단계에서 작성된 기술자료을 토대로 복층터널의 완공시 형상 및 시공순서 등을 3차원적 요소에 의한 시뮬레이션 구현으로 설계의 적정성, 시공성 등을 평가하고자 세부항목으로 선정함

– **복층터널의 다목적 활용을 위한 조합 설계기준 및 유지관리 기술개발**은 입지선정기술의 요소정립과 입지선정기준을 구축하여 교통/수로 겸용을 위한 단면분할, 선형기준등 을 복합기능에 맞게 조합하고, 안정적인 기능전환을 위한 기술을 개발하고자 선정함

– **다목적 복층터널의 복원력(resilience) 증진기술 개발**은 다목적 복층터널의 기능적 측면 활용에 따른 터널 내부 작용수압 저감, 부력 방지 및 복원력 저감요인과 회복대책을 반영한 복원력 평가지표 등을 선정함

– **수로 겸용 복층터널의 수방기법 및 통수능 검토 기술 개발**은 교통터널과 방수로를 겸하여 사용할 경우에 적절한 운영이 이루어지지 않는다면 인명피해 등 심각한 결과를 초래할 개연성이 크므로, 수리실험과 수치해석, 시나리오 분석 등 다방면의 분석을 통해 위험도를 낮추고 신뢰도를 높일 수 있는 최적 설계 및 운영 기법을 선정함

■ 2세부 : 효율적인 복층터널 시공기술 개발

– **확폭·분기부 굴착장비 설계기술과 굴착장비 제작기술 개발**은 대심도 복층터널의 확폭을 위해 사용될 수 있는 로드헤더의 커팅헤드를 셔블계 굴착기에 어태치먼트 형태로 부착하여 사용할 수 있는 제품을 개발하는 것을 목표로 하고 있음. 현재 관련 설계·제작기술이 전무하므로 3년간 연차별로 단계적인 설계·제작 기술을 개발하고자 하며, 영일공업과의 공동연구를 통해 건설연에서 개발한 설계기술에 기반한 커팅헤드 어태치먼트를 제작하고자 함.

– **확폭·분기부 시공을 위한 특수 콘크리트 세그먼트 개발**은 종래 확폭·분기부 시공시 일반적으로 적용되고 고가의 강재세그먼트를 대체할 수 있을 것으로 판단됨. 이를 위하여 세그먼트 관련 노하우를 보유하고 있는 한국건설기술연구원과 영국 OVE ARUP 사 등에 같은 해외 컨설팅을 추진할 계획임.

– **복층 슬래브 타설체 보강을 위한 그라우팅 재료 개발 및 초소형 혼합 믹서 개발**은 대심도 복층터널의 경우 상대적으로 협소한 공간내에서 모든 굴착 및 보강 공사가 수행되어야 하는 특수한 환경에 있으므로 공간활용에 유리한 공법 및 장비가 필요하다. 그러나, 현재 사용되는 그라우팅 혼합장비는 3조식 또는 4조식의 획일화된 장치를 사용함으로써 규모가 매우 크고 복합한 구조를 가지므로 협소한 공간활용에는 적합하지 않은 단점이 있다. 따라서, 본 과업에서 개발예정인 2액형 급결 그라우팅을 수행 할 수 있는 기존대비 50% 공간을 줄인 소형화장비의 개발하며, 한국건설기술연구원의 SOC인증 센터에서 현장 실험을 통하여 검증하고, 시작품 터널 내부에서 종합적으로 부착설비의 성능을 실증함

– **대편평율/변단면 확폭 및 보강기술**은 대심도 복층터널 네트워크 구성시 필연적으로 발생되는 분기부등에 적용되는 기술로서, 최종적으로는 복층터널 대평평율/변단면 확폭부 보강기술에 대하여 보강방법 및 공법, 보강범위, 시공방안 등이 최종 목표로 선정함.

– **복층터널 구조체 시공 기술·장비 개발**은 구조물의 특성상 도심지 시공이 예상되며 터널 내부에서 중간슬래브에 의해서 복층 구조물이 구축되기 때문에 연속시공이 가능하도록 관련 기계화·자동화 시공기술의 확보, 공기단축을 위한 각종 장비 및 시공법 개발이 필수임. 이

같은 목적을 달성하기 위하여, 복층터널의 중간슬래브의 최적화 시공공법 개발과 일체형과 분리형 브라켓 연결부 개발 및 시공기술 개발을 최종목표로 설정하였으며, 기존의 크레인을 이용한 가설속도(40m/일)를 70%이상 향상시킨 가설장비의 개발, 슬래브 최적화 시공공법, 그리고 최적화된 브라켓 설치공법을 최종성과물로 선정함. 복층터널 슬래브 설치를 위해서는 하부를 지지할 좌우 브라켓이 필요로 하며, 이때 브라켓의 형식, 설치공법, 탄성받침 등의 개발을 최종 성과물로 제시함. 또한 슬래브 설치시 복층터널 라이닝의 브라켓 설치지점에 하중이 집중되므로 이를 안정적으로 지지하기 위해서는 라이닝의 거동분석을 통한 보강방안이 필요하며, 이에 대한 각각의 공법의 개발을 최종 성과물로 제시함

- **복층터널 취약 특수부 안정성 확보 및 모니터링 기술**은 안정성 확보 기술 개발과 모니터링 기술 개발로 구분됨. 안정성 확보기술은 지중 분기부 및 합류부에 발생되는 초근접(0.1D~0.2D) 필라부와 본선터널과 분기터널의 위치관계에 따라 발생되는 지반구조상 취약부 및 특수부, 그리고 복층터널 유출입부에서의 안정성 확보를 위한 보강기술임. 분기부 필라 보강을 위한 지보재(시작품개발), 분기부 시공 가이드(시공품질관리 기술) 등이 최종 성과물로 제시될 것임.
  - 대심도 복층터널의 경우 내부 슬라브의 형상 관리가 시공안전성 및 공용중의 안전성 관리에 있어 매우 중요함. 그러나 현재의 터널 내부 형상관리 기법은 터널 라이닝 및 굴착 형상에 대한 연구만 진행되어 있는 상태이므로 복층터널의 내부 슬라브 형상 변화에 의한 사고를 대비하기 어려움.
  - 위와 같은 문제점을 극복하기 위해서는 시공 중 및 공용 중의 복층 터널의 내부 슬라브의 처짐 및 변형률을 실시간으로 계측하여 터널 내부형상을 모니터링 할 수 있는 시스템을 개발할 필요가 있음. 이에 따라 “대심도 복층터널 내부형상 모니터링 기법 및 관리 기술 개발”을 최종목표로 설정함.

- **대단면 복층터널의 생애전주기 정보화 및 안정성 통합 관리 기술 개발**은 복층터널 설계에서 BIM을 이용한 정보화 관리 및 FEM 연계 해석을 통한 터널의 안정성 분석을 통합적으로 수행하며, BIM 기술과 FEM 솔버를 통합하여 정보화와 동시에 터널의 안정성 획득 가능한 기술을 개발하여 복층터널의 생애전주기에 관리기법으로 도입 활용함, 복층터널 설계에서 BIM을 이용하여 정보화 하는 기술이 전무한 실정이며, 복층터널 설계에서 BIM과 FEM을 융합하여 정보화와 동시에 터널의 안정성을 획득 할 수 있는 프로그램이 전무하며, 국내외적으로, 건설 분야에서는 설계 단계에서 효율성을 높이기 위해 BIM-FEM 복합 상용 프로그램의 요구가 증가하고 있음. 그러나 대단면 복층터널에 관한 BIM 프로그램은 전무하며 설계 및 시공단계를 정보화 하여 관리할 수 있는 기법도 미비한 실정임
  - 공간(분기구, 본선, 진입구)과 구조(라이닝, 중간슬래브) 담당 과제 연구진으로부터 ①상시운영중 ②화재 및 비상 발생기 발생 될 수 있는 안정성 및 유지관리 내용을 취합하여 유지관리 가이드라인 총괄 작성 및 복층터널 성능중심의 평가기술 항목(변상, 안전성, 내구성, 기능성) 개발.
  - 이러한 내용을 종합적으로 고려하여 대단면 복층터널의 생애전주기 정보화 및 안정성 통합 관리 기술 개발을 목표로 함

- **도심 대심도 수직구의 친환경 시공기술 개발개발**은 지하 복층 도로터널 지하구조물 건설시 환기구, 대피구, 작업구등의 목적으로 수직구를 시공하여야 하므로 이를 친환경 및 경제적

으로 건설하기 위한 기술을 개발함.

◦ 수직구 건설 환경에 효율적으로 대응하기 위한 시공은 수직구용 콘크리트 라이닝 벽은 지반조건별 다양한 수직구 형태에 적용이 가능하며 재활용이 가능하며 온도조절용 연속 상승 장치를 개발하여 수직구벽을 급속시공이 가능하도록 하고 더불어 내부 계단 및 슬래브 구조물 조립공법을 연계하여 기존 수직구 현타공법 보다 약30%~50% 내외의 공기단축 효과와 더불어 경제적 절감효과도 높은 수직구 건설공법 개발이 필수적임

- **도심 대단면 복층터널 고함수비 굴착버력 친환경 급속처리기술 개발**은 갱내에서 굴착버력의 함수비를 50%로 저감 할 수 있는 기술(공법/제품 개발), 굴착버력 급속 탈수기술(공법/제품 개발), 굴착버력 급속 처리를 위한 고성능 고화재 및 혼합장비 개발(공법/제품 개발) 등이 최종 성과물로 제시될 것임.

■ **3세부 : 복층터널 환기 및 화재안전 설계 기술개발**

- **복층터널 네트워크형 환기 설계 및 해석 기술**

◦ 복층터널 네트워크형 지하고속도로에서 최적의 환기설계 기술 확보를 위한 지침의 마련은 향후 국내에 계획 예정인 U-Smartway 프로젝트에서 국내 기술로 적용될 것으로 판단됨. 복층터널은 최근 국내외에서 도심지의 교통난 해소를 위한 방편으로 주요개발의 대상이 되고 있으며, 이미 운영되는 터널이 존재하고 있음. 복층터널의 건설에 있어 준공후 운영중 가장 중요한 요소는 환기·방재 부문에서 안전성을 확보하는 것임. 따라서, 복층터널의 환기설계를 위한 최적 설계인자들에 대한 국내기술확보는 국내의 목측터널 건설시장 뿐만아니아 외국의 건설시장 진출에 매우 중요함. 특히, 복층터널은 네트워크형으로 건설될 가능성이 높으며, 이 경우, 분기부와 합류부에서의 기류예측 및 제어기술에 대한 사전 연구가 반드시 필요함.

◦ 대심도 네트워크형 복층터널 최적의 환기설계를 위하여 기류유동에 대한 네트워크 이론을 기반으로 한 환기시뮬레이션 모델을 개발이 요구됨. 이에 본 연구에서는 복층터널 네트워크형 환기에 대한 성능을 예측하고 적정한 설계사양을 공학적 분석이 가능한 알고리즘을 개발하고 소프트웨어를 개발하고자 함.

- **복층터널 오염물질 확산 예측 및 외부 배출 방지 기술**

◦ 복층터널 오염물질 배출량 산정 : 차량에 오염물질 배출량은 터널의 환기시스템의 용량 산정을 위한 기본적인 인자임, 그러나 극내의 경우, 터널과 같이 정속주행, 고온의 엔진 상태에서 오염물질 배출량을 실측한 사례가 없으며, 이로 인하여 환기설비용량의 적정성이 확보되지 못하고 있는 실정임. 현재 국내 모든 터널의 환기기 가동률이 거의 0인 점은 차종별 오염물질 배출량이 과다하다는 것을 반증하고 있음. 이에 차종별 오염물질 배출량을 산정하고자하며, 이를 통해서 환기용량을 현재의 기준보다 25%이상 감소할 수 있을 것으로 예상됨.

◦ 환기 운전제어로직 : 복층터널의 경우, 다수의 환기방식을 조합한 조합환기방식의 적용이 불가피할 것으로 예상되며, 조합환기방식에서는 동일한 환기풍량일지라도 환기기 조합운전방법에 따라서 동력비가 다르게 나타남. 따라서 요구되는 환기량에 대해서 소요동력을 최소로 하는 최적의 환기기 운전 조합이 결정되어야 함. 이에 본 연구에는 환기

운전 조합의 최적화 방법을 제시하고 소요동력을 최소화할 수 있는 제어로직을 개발함.

◦ 터널은 터널내부에서 발생하는 오염물질을 터널의 출구나 환기탑을 통해서 집중적으로 배출하며, 오염물질의 농도는 대기환경기준을 만족할지라도 지속적으로 배출되며, 총량 매우 크다는 점이 문제시되고 있다. 따라서, 외부 배출양을 최소화하고 주변에 미치는 영향을 최소화하기 위한 기술의 개발이 요구됨.

◦ 오염물질에 대한 처리기술은 다양한 방법이 국·내외에서 연구되고 있으며, 기존의 기술이 공장 등의 오염물질의 배출을 최소화하기 위해서 적용되고 있다. 이에 본 연구에서는 오염물질제거기술에 대한 조사·분석을 통해서 복층터널에 적용 가능한 오염물질제거기술을 검토하고 이를 적용하기 위한 한계조건 등 설계기준을 제시하는 것을 목표로 하였음.

◦ 현재까지 터널 환기탑이 대부분 민원 지역이 아닌 산악부에 설치되어 있는 이유로 주변 영향에 대해서 심도있는 연구가 수행되지 못하고 있는 실정임. 복층 네트워크형 터널의 경우, 도심 지역의 환기탑 설치가 필연적이므로, 주변영향을 최소화할 수 있는 환기탑 설계사양에 대한 검토가 반드시 필요함.

– 복층터널 화재확산 제어 및 내화 성능 향상 기술

◦ 터널에서의 화재안전설계는 설계화재강도를 기반으로 시작되므로 복층터널에서의 설계화재강도 제시를 위한 제반 연구는 복층터널내 최적 화재안전 설계를 위한 가장 근본적인 핵심 요소로 분류됨.

◦ 복층 네트워크형 터널에서의 화재는 낮은 층고로 인해 일반 도로터널 보다 연기농도가 증대하며, 연층하강이 빠르게 진행될 것으로 예상되므로, 이에 대응하기 위해 국소배연이 필수적이며, 국소배연방식인 대배기구 시스템 개발 및 배연 시스템 운영 방안 제시가 피난 안전성을 담보할 수 있는 기술로 평가됨.

◦ 중간슬래브 등 터널 구조부재의 내화성능 및 화재 후 평가/보수 보강 기술은 복층 터널의 구조적 안전성 확보와 동시에 화재 후 터널운영 여부에 가장 큰 영향을 줄 수 있는 핵심 기술임.

◦ 화재진압 장치제작 및 성능검증 : 분사노즈을 통하여 하나의 분사노즈이 담당할 수 있는 최대거리를 산정하고, 화재 위치별 효율적인 소화약재의 분사를 위한 위치 탐지 및 분사 각도를 효율화 하기 위한 자동 본체부를 개발하기 위해 최종목표의 세부연구내용으로 설정함

◦ 자동화 소화설비 제작 및 성능검증 : 위와 같은 화재진압 장치 및 부대설비와 합쳐진 복층터널용 자동화 소화설비 에 대한 설계방안을 제시하고 이러한 성능검증을 통한 DATA 자료 수집 및 분석으로 효율적인 적용방안을 도출하기 위해 최종목표의 세부연구내용으로 설정함

◦ 자동화 소화설비 매뉴얼 개발 : 자동화 소화설비의 복층터널 지하도로 적용을 위한 설계/시공/유지관리 방안을 제시하기위해 최종목표의 세부연구내용으로 설정함

◦ 건축물이나 지하철 등에서 사용되고 있는 제연커튼이나 제연경계벽 등의 시설물은 관련 분야에서 제연설비에 관련한 기준, 지침 등의 법제화가 이미 시행되어 있어 방재 계획시 제연설비의 일부로서 연기확산 지연장치의 적용이 일반화 되어 있는 실정임

◦ 그러나, 터널분야에서는 이러한 제연설비의 적용 개념이 건축물 등의 타 분야에 비해 미흡한 실정이며 차량의 지속적인 통행이 존재한다는 조건과 터널이라는 구조물 특성으로 인해 건축물 등의 타 분야에서 적용하고 있는 제연커튼이나 제연경계벽 등의 연기확산 지연장치의 개념을 그대로 적용하기에는 어려운 실정임.

◦ 특히, 도심지 대심도 네트워크형 복층터널 등의 구조물의 경우는 터널 내부에서 화재 발생시 연계되어 있는 분류·합류되는 터널로의 화재연기 전파 가능성 등으로 인해 기존 방재시설과는 다른 개념의 추가적인 방재시설에 대한 요구가 발생되고 있는 실정임

◦ 따라서, 본 연구에서는 터널 내 화재사고 발생 시 인명사고와 물적 피해를 최소화하기 위해 화재 초기에 연기 확산 속도를 지연시켜 줄 수 있으며, 복층터널에 설치 가능한 구조 및 작동이 가능한 장치 및 시스템을 개발하고자 함

- **복층터널 화재안전 평가 및 관리시스템 구축**

◦ 대심도 복층터널의 안전성 확보를 위한 화재 시나리오 개발 및 운영 방안수립을 최종목표로 설정하였으며, 한국건설기술연구원, 철도기술연구원, 한국수자원공사 연구원 등의 국책연구기관과 재난 대비 실시간 통합안전관리 시스템 구축 및 안전 방재 분야의 연구를 수행하고 있으며, 특히 사회기반시설의 위험관리 연구에 대한 경험을 통해 연구 성과의 실용화 및 효율성을 확보할 수 있음

◦ 복층 터널내의 WPAN망 연동 스마트 피난경보 앱 개발 및 이와 관련한 터널내 환기(제연)설비물의 운전방향을 고려한 안전한 피난루트 제공이 필요함. 이는 최단 피난대피방향이 제연방향과 동일할 경우 피난자에게 치명적인 영향을 줄 수 있음. 따라서 직관적이며 재난시 위치파악이 손쉬운 맵과 터널내 환기설비 연동에 따른 최적 피난방향 검색이 가능한 피난처 안내 프로그램 개발이 필요하며 다음과 같은 기능이 확보될 필요가 있음

◦ Bluetooth 기반의 안전하고 신뢰성 있는 WPAN망 확보 : IEEE802.15.1기반 Bluetooth 4.0, 재난에 강한 신뢰성 있는 WPAN망

◦ 터널내 2D or 3D E-GIS 정보 구축 : 직관적이며 재난에 강력대응이 가능한 지리정보, 경량화된 DB 구축

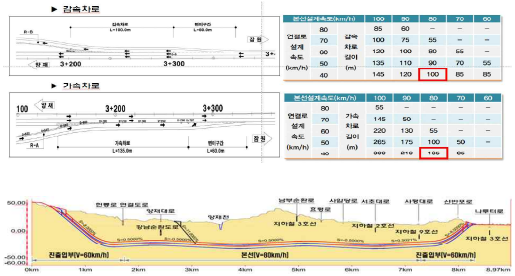
◦ WPAN망 감시 시스템 구축 : 신뢰성 있는 무선망 확보, 터널내의 먼지 분진 등 가혹 실내 환경

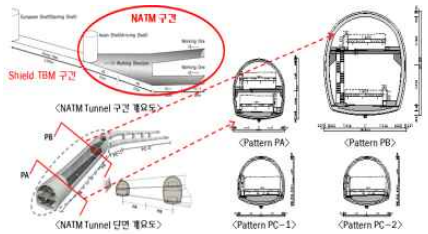
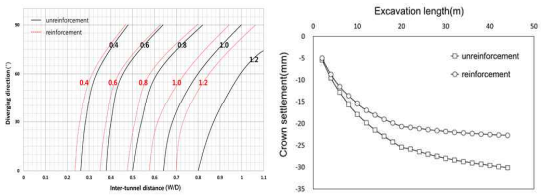
2. 연구수행내용 및 결과

* [별책] 세부별 연구수행 주요내용 참조

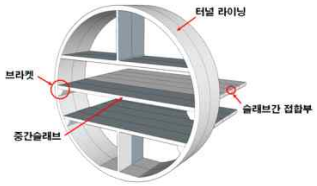
가. 차년도별 연구개발 내용 및 결과

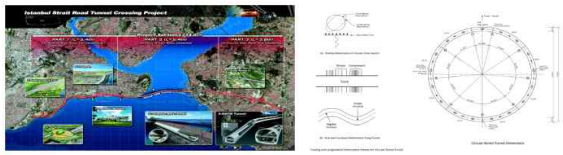
■ 복층터널 최적화 단면 설계 기술

핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
복층터널 최적화 단면 설계기술 (삼보기술단)	1차 년도	• 지하 IC/JCT 연결로 유출입 접속부 및 노즈부 설계사례 조사 • 국내·외 복층터널 내 공단면 설계 및 시공사례 조사 • 국내·외 복층 및 분기부관련 설계기준 조사 • 수치해석에 의한 검증 방안 검토 • 복층터널 분기구간의 설계, 시공사례 및 관련 문헌 조사 • 복층터널 관련 연구 문헌자료 조사 및 분석	- 국내·외 터널 설계 및 시공사례 조사 - 국외 복층터널 사례 조사 - 터널내 접속부 사례 조사 - 국내외 터널 관련 설계기준 조사 - 수치해석 검토계획 수립
	2차 년도	• 지하 IC/JCT 연결로 접속부 및 노즈부 기하구조 검토 • 복층터널 내 내공단면 구성요소 검토 • 노즈부 기하구조 수치해석에 의한 단면검토 • 복층터널 분기구간 접속부의 터널 형상별 굴착 거동 해석	- 복층터널의 표준단면은 NATM과 쉴드 TBM의 단면에서 영향인자별 단면적에 영향을 미치는 순서에 차이가 있어 향후 관련 연구기관과 협의를 통해 3차 년도에 최종 단면 선정 - 복층터널 분기부 대단면 터널 단면구성은 쉴드공법을 적용한 단면보다는 단면구성 측면에서 유리한 NATM 적용 - NATM에서 분기부 대단면에 대한 예비 해석을 실시한 결과 암반 3등급이상 조건에서는 대칭과 비대칭 형태의 안정성에는 큰 차이가 없으나 향후 상세 검토 필요함
	3차 년도	• 지하IC/JCT 연결로 접속부 및 노즈부 기하구조 검토 • 복층터널 내공단면 구성요소 및 최적단면 선정	- 표준단면 3개 이상 선정 - 터널 분기부 기하구조 검토 - 분기부 안정성 검토를 통한 분기부 대단면 선정
	4차 년도	• 복층터널단면 설계 • 복층터널 기하구조 검토 • 복층터널 취약부 설계방안	- 복층터널단면 타분야 의견 반영 - 복층터널 분기부 선형 설계
	5차 년도	• 복층터널 단면에 대한 가상설계 지원 • 복층 표준단면 설계 가이드라인(안) 제시	- 복층터널 단면에 대한 가상설계 지원  - 복층 표준단면 설계 가이드라인(안) 작성
	6차 년도	• Test bed 단면계획 및 시공 지원 • 복층 표준단면 설계 가이드라인(안) 보완	- Test bed 단면 구성요소 및 터널 시공순서 계획 - 복층 표준단면 설계 가이드라인(안) 보완

핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
분기구간 복층터널 안정성 평가 및 굴착 설계기술 (동국대학교 산학협력단)	1차 년도	• 국내·외 복층터널 설계 및 시공 사례 조사 • 국내·외 대단면 터널 접속부 굴착 및 보강사례 조사 • 복층터널 관련 연구 문헌 자료 조사 및 분석	- 해외 사례를 중심으로 복층터널의 설계 사례를 조사함 - 단면 크기에 따라 다양한 굴착계획이 적용  - 굴착순서에 따른 터널의 안정성, 보강재의 축력과 모멘트, 지반의 안정성 등을 검토하는 것을 확인함 - 분기조건에 따라 터널의 형상과 이격형태가 다양하게 되는 분기구간의 특수성을 충분히 고려하여 수치해석과 축소모형 시험을 이용한 안정성 평가를 실시하여 연구를 진행함
	2차 년도	• 수치해석을 통한 복층터널 분기구간 터널 거동분석 • 축소모형시험을 통한복층터널 분기구간 터널 거동 분석	- 결과적으로 본선과 분기터널의 이격거리가 0.7D 이하인 경우는 본선과 분기터널을 모자 형태의 하나의 대단면으로 시공하는 것이 안정성 측면에서 유리한 것으로 판단됨 - 모래, 석고, 물을 적절한 배합비로 7일, 14일, 28일 강도를 기준으로 양생하였으며 일축압축시험을 진행함 - 두 터널이 결합된 모자형태의 단면조건과 수평이격 단면조건, 15° 이격 단면조건에 대하여 이격거리를 변화하며 축소모형시험을 진행함
	3차 년도	• 2차원 단면 수치해석을 통한 분기구간 안정성 평가 • 축소모형시험을 통한 분기구간 안정성 평가 • 3차원 상세 수치해석을 통한 굴착 안정성 분석	- 2차원 단면 수치해석 결과를 이용하여 간섭체적비, 강도-응력비, 파괴접근도 방법으로 분기구간 안성성 평가를 수행 - 이격 조건을 0°, 30°, 60°, 90°, 모자형의 5가지로 변화하며 축소모형시험을 수행함 - 굴착방법 조건을 2분할, 3분할, 링컨분할, 중벽분할의 4가지 조건에 대하여 3차원 수치해석을 수행함 - 3차원 수치해석의 결과 천단침하 감소의 측면에서는 링컷분할 방법이 유리할 것으로 판단되고 막장변위 감소의 측면에서는 3분할 굴착이 유리할 것으로 판단됨
	4차 년도	• 복층터널 분기구간의 안정성 평가 방안 수립 • 3차원 상세 굴착수치해석 수행	- 2차원 단면 수치해석 및 모형시험결과를 이용하여 분기단면의 구조적 안정성을 분석함 - 각각의 암반등급에 대하여 터널간 이격거리와 이격각도에 대하여 평가차트를 도시함 - 분기구 터널 단면에 대한 3차원 상세 굴착수치해석 수행함 - 터널 분기부에 대한 굴착 영향을 분석함 
	5차 년도	• 3차원 영향을 고려한 평가방법 개발 • 가상설계지원 • 분기구간 단면 설계 가이드라인(안) 작성	- 3차원 해석결과를 반영한 분기구간 터널 안정성 평가방법 - 가상설계지원을 위한 3차원 수치해석 수행 - 연구결과들을 종합한 분기구간 단면 설계 가이드라인(안) 작성 및 관련분야 실무전문가 기술자문 수행

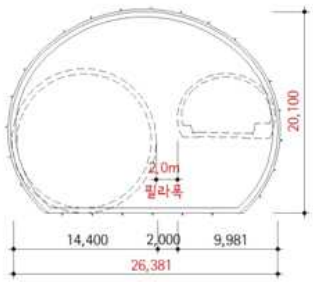
■ 복층터널 구조체 설계 및 성능평가 기술

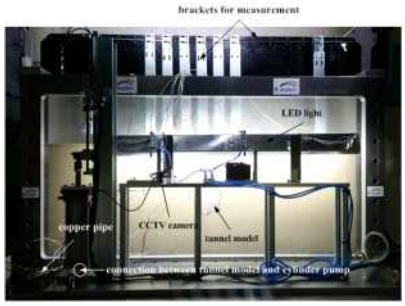
핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
복층터널 중간슬래브 단면 설계기술 및 조립지침 개발 (경희대학교 산학협력단)	1차 년도	• 복층터널 중간슬래브 선행연구 사례 조사 • 해외 복층터널 중간슬래브 설치 사례 및 단면 설계 사례 조사 및 분석 • 복층터널 중간슬래브설계/성능 요구 조건 정립 • 중간슬래브 단면설계/성능 요구 조건 정립	- 해외 사례를 조사하여 복층터널 중간슬래브 설치 사례 및 단면 설계 사례를 조사 및 분석  - 중간슬래브 설계 조건에 따른 수치해석 및 중간슬래브 기본 단면의 성능 요구조건을 정립함
	2차 년도	• 구조해석모델을 이용한 중간슬래브 단면 및 평면크기에 따른 거동분석 • 프리스트레싱 도입에 따른 중간슬래브 단면감소 방안 마련	- 일반구간과 팽창줄눈 구간에서의 주응력 분포를 비교하였으며, 팽창줄눈 구간에서 발생하는 응력이 더 크게 나타남 - 비상대피시설구간에 부분적으로 보를 설치하면 인장응력의 발생을 완화시킬 수 있음 - 현장타설 슬래브를 이용한 철근배근중간슬래브 모델 개발함 - 프리캐스트 슬래브를 이용한 프리스트레싱 중간슬래브 모델 개발함. 프리스트레싱을 통해 중간슬래브의 두께 조절 가능 - 하지만 슬래브 두께가 너무 작아 질 경우는 처짐량 제어가 어렵기 때문에 적정 두께를 유지하며 프리스트레싱 적용
	3차 년도	• 중간슬래브 처짐,소음 등 사용성 고려 • 중간슬래브 유지보수에 따른 두께변화 고려 • 중간슬래브 터널길이 방향에 따른 변형 거동 및 안정성 평가	- 유지보수를 위한 슬래브 인상 시 발생하는 응력을 지지점 및 구간 별로 분석함 - 중간슬래브 길이가 50m 이상 시 응력이 일정하게 수렴 - 100mm 규격의 신축이음장치 사용 시 국내 환경에서 허용되는 중간슬래브의 최대 길이는 180m 임
	4차 년도	• 슬래브간 접합부 연결 구조 설계기술 기반 마련 • 라이닝 강결부 설계기술기반 마련 • 중간슬래브 설계기준(안) 작성	- 구조해석을 통한 슬래브간, 슬래브-세그먼트 접합부 연결 구조에 따른 거동 특성 분석 및 설계기술 기반 구축 - 구조해석을 통한 라이닝 강결부 구조에 따른 거동 특성 분석 및 설계기술 기반 구축 - 중간슬래브 최적단면 상세 설계기술 개발 - 중간슬래브 최적 설치길이 도출 - 슬래브간 접합부 연결 구조 상세 설계기술 개발 - 중간슬래브와 라이닝 상호연계 설계기술 개발 - 라이닝 강결부 내하력 평가 실험 수행
	5차 년도	• 중간슬래브 조립지침(안) 작성 • 중간슬래브 모형을 이용한 축소 조립 구현	- 중간슬래브 조립을 위한 재료 및 시공에 대한 중간슬래브 조립지침(안) 작성 - 중간슬래브 조립 구현을 위하여 중간슬래브 축소 조립모형 제작
	6차 년도	• 복층터널 중간슬래브 설계기준(안) 수정 및 보완 • 복층터널 중간슬래브 조립지침(안) 수정 및 보완 • 중간슬래브 설계기준(안)을 적용한 상세 설계 • 테스트베드 현장계측 및 분석을 통한 중간슬래브 설계기술 검증	- 건설장비 하중을 고려한 중간슬래브 설계기준(안) 보완 - 중간슬래브 거치용 브래킷의 형상을 고려한 설계기준(안) 보완 - 중간슬래브 조립지침(안)에서 철근, 받침장치, 슬래브 보관, 야적 등에 대한 사항을 보완 - 가상현장을 고려하여 설계기준(안)을 적용한 중간슬래브 및 브래킷의 상세 설계 수행 - 실험 데이터 분석을 통하여 중간슬래브 설계기술 검증 - 테스트베드에서 중간슬래브 거동 계측을 위한 하중재하 실험 수행

핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
복층터널 중간슬래브 구조와 콘크리트 라이닝 간의 상호 연계 내진설계기술 (한서대학교 산학협력단)	1차 년도	• 해외 복층터널 중간슬래브-세그먼트 접합부 동적해석 및 내진설계 사례 조사 및 분석 • 중간 슬래브 및 분기, 접속부 단면/내진 설계관련 자료 수집 및 분석 • 복층터널 중간슬래브설계/성능 요구조건 정립 • 중간슬래브 내진설계/성능 요구조건 정립	- 해외 복층터널 중간슬래브-세그먼트 접합부 동적해석 및 내진설계 사례 조사 및 분석 대표적으로 터키 유라시아 해저터널 및 일본 아쿠아라인 말레이시아 수로 겸용 터널에 대해서 상세히 조사함 
	2차 년도	• 복층터널 실대형 진동대시험 수행 • 복층터널 중간슬래브세그먼트 접합부동하중전파에 따른 구조물 응답특성 분석을 위한 1g 실대형 진동대시험 수행 • 1g 중력장 하에서의 접속부 등 취약지점에서의 변위 및 응력 거동특성분석	- 부산대학교 지진 방재연구센터에서 대형 진동대시험 수행 - 수행 후 2차원 내진해석을 통한 검증과 지진감쇠고무받침의 유무로 인하여 지진력 감쇠를 진행함  - 1g 중력장 하에서의 접속부 등 취약지점에 대한 변위 및 응력 거동특성을 파악하여 보강 보완하기 위한 추가연구를 진행함
	3차 년도	• 복층터널 실내 모형 진동대 시험 수행 • 중간슬래브-라이닝 지점 조건별 지진하중 전달 메커니즘 규명 및 내진 설계기술 개발 • 2차원 내진해석을 통한 진동 저감장치 내진성능 검증 및 보고서 작성	- 한서대학교 지반연구실 내에서 실내 모형 진동대 시험을 실시 - 3가지 단부 지지조건(양단 강결, 한 측단 탄성지지, 양단 탄성지지)을 이용한 실험 데이터 계측 결과 비교 분석 및 2차년도 시험 결과와 비교분석(모형시험에서 발생할 수 있는 오차 검증) - 2차원 모델링을 통한 실험내용 보강 해석
	4차 년도	• 복층터널 원심모형시험 수행 • 중간슬래브/세그먼트 접합부 전달 메커니즘규명 및 내진 설계기술 개발 • 2차원 내진해석을 통한 진동 저감장치 내진성능 검증 및 보고서 작성	- 카이스트 지오센트리퓨지 내 원심모형시험을 실시 - 지지조건(강결연결,탄성받침)별 시험 데이터 계측결과 비교 분석 - 원심모형 시험 데이터 계측 결과 비교분석(인공지진파,Ofunato, Hachinohe) - 원심모형시험 결과와 실내 모형 진동대 시험 결과 비교 분석(모형시험에서 발생 가능한 오차 검증) - 2차원 동적 수치해석을 통한 시험내용 보강 해석
	5차 년도	• 복층터널 내진설계 가이드라인(안) 작성 • 복층터널 중간슬래브 동적시험절차서(안) 작성	-복층터널 내진설계 일반 개발 -동적시험 절차서(안) 개발  
	6차 년도	• 복층터널 내진설계 가이드라인(안) 작성 • 복층터널 중간슬래브 동적시험절차서(안) 작성	-복층터널 내진설계 일반 -동적시험 절차서(안)

핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
슬래브 동하중 전파에 따른 구조물 응답특성 분석(브이테크)	2차 년도	• 중간슬래브 구조해석 가이드라인 제시 •지점조건, 슬래브의 형상, 차량의 속도에 따른 응답분석 방법론 정립	- 중간슬래브의 구조적 특성, 차량의 동특성, 노면조도의 특성 등을 고려한 모델링 방법 제시 - 중간슬래브의 모드해석 및 차량주행에 대한 동적해석 방법 제시
	3차 년도	•중간슬래브의 차량-슬래브 상호작용을 고려한 동적해석 •취약부(터널접속부,연결부 및 중간슬래브 등)에 대한 동적 거동 특성 파악 및 분석	- 노면상태, 연결부 및 주행속도를 변화에 따른 동적해석.
	4차 년도	•복층터널 최적화를 위한 수치해석 •복층터널 상부슬래브 및 하부슬래브의 차량-슬래브 상호작용을 고려한 동적 해석	- 상부슬래브와 하부슬래브의 구조특성을 고려하여 노면조도, 연결부 특성, 주행속도 등의 변화에 따른 동적특성 분석.

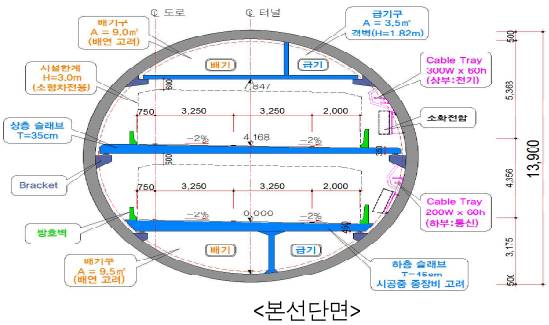
■ 복층터널 근접시공 안정성 확보를 위한 설계 기술

핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
도심권역 특성에 맞는 맞춤형 복층터널 지보/보강 설계기술 개발 (대흥미래기술)	2차 년도	• 지하수영향 예측용(변수조건 포함) 실내모형 시험체 제작 및 시험 수행 • 대심도/대단면 터널 지보/보강 기술 국내·외 설계기술 사례 분석	- 지하수 영향 예측용(변수조건 포함) 실내모형 시험체 제작 및 시험수행 - 1/80 scaled model에 centripetal acceleration 을 적용함으로써 실제 지중응력을 모사 - 대심도/대단면 터널 지보/보강 기술 국내외 사례조사 - 특허조사 및 국내외 현장 사례 조사
	3차 년도	• 지보/보강 공법 국내·외 자료 조사 • 복층터널에서의 지보/보강 공법(안) 활용방안	– 지보/보강 공법 국내·외 신기술 검토 – 개발 지보/보강 공법 개념 정립 및 특서 조사 – 복층 터널의 분기구간 발생 원인 분석 – 분기구간의 터널 형식 조사 및 터널 단면 분석 – 일반 터널의 강지보재 설치 방법 및 문제점 분석을 통한 기술 개발 방향 제시 
	4차 년도	• 도심지 복층터널 지보/보강 공법(안) 안정성 평가 • 도심지 복층터널 지보/보강 공법(안) 표준도서 작성	– Q-System에 의한 지보량 산정 및 지보패턴 선정 – 3차원 수치해석을 통한 분기구간 대단면 터널 안정성 평가 – 강지보재를 고려한 수치해석 수행 – 대단면 터널의 강지보재 적용 설치 방법 제안 – 설계 지침안, 표준 도면 작성

핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
복층터널 근접시공 안정성 확보를 위한 설계기술 (한양대학교 에리카산학협력단)	1차 년도	• 근접시공에 따른 지반거동과 인접구조물 손상 예측 평가기술 고찰 • 국내·외 구조물 손상기준 조사 및 실내모형시험 사례 연구	- 실내 모형시험 사례 14건, 싱크홀 사례 2건, 근접시공에 따른 지중구조물의 손상평가 사례 5건, 근접시공에 따른 지상구조물의 손상평가 사례 9건 조사 
	2차 년도	• 원심모형시험 수행 • 복층터널 굴착과 지하수변동에 따른 지반거동 분석	- 침하원인 및 굴착공법별 지반손실 원인 분석 - 지반침하에 대한 경험식, 이론식, 수치해석적 방법 고찰 - 원심모형시험 3가지 시나리오 수행 및 분석  - 지반손실률과 C/D비에 따른 지표침하와 지중침하 경향 분석 - 지하수 손실에 따라 지표침하와 변곡점의 위치 변화 분석
	3차 년도	• 예측 가능한 지중구조물들(터널, 전력구 등)과의 근접시공에 대해서 영향성 검토 후 대책 및 설계 차트 제안 • 인접구조물의 손상평가 차트 및 도구 개발	- 지반손실률 3가지(1.0%, 3.0%, 5.0%), 공동구와 분기터널의 이격거리 3가지(5m, 10m, 30m), 본선터널과 분기터널이 이루는 각도 2ㄴ가지(36°, 45°)를 고려하여 총 18개 해석 케이스 수행 - 각변위-거리/직경 관계 제시 - Capacity diagram을 이용한 공동구 부재별(바닥부재, 중앙벽체, 좌측벽체) 안정성 분석 및 기존 터널 라이닝 안정성 분석 수행
	4차 년도	• 실내모형시험 제작 및 수행 • 변수조건에 따라 지상구조물에 미치는 영향 분석 및 손상 평가	- 수치해석 방법을 이용하여 다양한 시공조건에 따른 수직침하 및 수평변위 예측 및 도출한 침하곡선을 바탕으로 터널 굴착에 따른 지상구조물에 대한 영향평가 진행(수치해석, 모형시험) - 다양한 시공조건(지반조건, 지하수 손실, 분기터널 지반손실률)에 따른 한계 지반손실률 및 침하 특성 분석 - 수치해석을 통한 방법과 마찬가지로 수평변형율 (εL), 각변위(β)를 계산한 후 손상도표에 표시하여 구조물에 대한 손상평가 수행 및 결과 분석
	5차 년도	• 구조물 형식을 다르게 적용한 모형시험 수행 후 구조물 손상평가 • 지상구조물에 대해 TBM 시공조건을 고려한 3차원 수치해석 수행 후 손상평가 • 연구 결과들을 종합한 가이드라인(안) 초안 작성	- 용접구조물, 콘크리트 구조물 제작 후 실내모형시험 수행 및 지반손실률, 토피고 별 손상평가 수행 - 3차원 수치해석 수행 및 손상평가 - 연구결과들을 종합한 근접시공 가이드라인(안) 작성
	6차 년도	• 근접시공 가이드라인(안) 내용추가 및 전문가 자문에 의한 검증, 수정 보완	- 근접시공 가이드라인(안) 내용 추가 및 전문가 자문을 통한 가이드라인 검증 - 가이드라인(안) 수정 및 보완

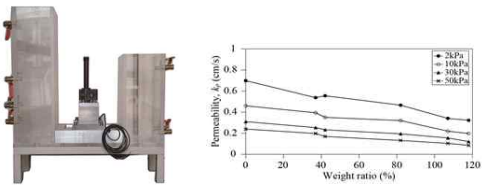
■ 복층터널 내부시설 운전자 친화 설계 기술개발 및 가상프로젝트

핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
복층터널 내부시설 운전자 친화 설계 기술개발 및 가상 프로젝트 ((주)동일기술공사)	1차 년도	• 국내 · 외 기술자료 조사 및 수집 • 복층터널의 공간적인 제약을 최소화하고 시인성 향상을 위한 입체표지 및 자연채광 방안 연구	- 국내 · 외 지하도로, 장대터널의 교통표지 및 친환경 조명시스템 사례조사 - 입체표지문자 설계방안 도출(시야 원근의 감소폭을 고려하여 수평으로 설치하여도 일정거리에서 수직으로 보이는 입체 문자 설계방안 도출) - 조명시스템에 대한 실내 실험 후 태양광 집광방안 연구(추적형 광덕트 형식 집광시스템 및 비구면 렌즈를 이용한 빛의 장거리 전달 방안 도출)
	2차 년도	• 입체표지판 시인성 향상 시작품 제작 및 거리별 시인성 검증을 위한 실내실험	- 입체표지판 설계에 대한 사전 가능성 파악을 위한 MOCK-UP 제품 제작(수평설치에도 수직으로 보이는 입체효과 검증) - 입체표지판 활용성 증대를 위한 다양한 교통 표지판 입체설계 수행(천장부, 측면부, 노면부)
		• 집광부/산광(도광)부 요소별 시작품 제작 및 성능 실내실험	- 태양광 추적형 집광시스템 및 비구면 렌즈 적용에 따른 이론적 광학설계를 위한 실험수행 - 이론적인 데이터에 근거하여 집광시스템 및 내부에 들어가는 비구면 렌즈 제작(실험결과 집광 최종부 까지는 10㎝ 이내로 집광, 도광부에서 빛의 산광이 발생함. 도광부의 빛의 직진성 확보를 위한 추가실험 추진(3차년도)
	3차 년도	• 입체표지판 시인성 향상 요소기술 실내실험 • 친환경 조명시스템의 태양광 장거리 전달 방안 및 실내 실험 연구	- 실험결과 하부조명방식의 경우에는 조명에 의한 재귀반사 기능으로 우수한 시인성 방안을 도출함 - 하부조명을 활용한 외부조명식 입체표지판에 대한 추가적인 연구수행 완료 - 4차년도 입체표지판 시범설치를 위한 사전 조사 수행 - 10M 도달시 10% 정도만 전달되므로 도광덕트 제작 설치비 투입대비 효율이 낮기 때문에 개선 필요성 도출 - 터널 입 · 출구부 조사방안에 대한 실험방안 제시
	4차 년도	• 입체표지판 시제품 제작 및 1차, 2차 실내 실험 수행 • 설치/시공/유지관리 매뉴얼 초안 작성 • 추적형 집광장치 실규모 제작 및 설치 • 빛의 전달효율 실내실험 및 결과분석 • 추적형 집광장치 실규모 설치 • 외부조명식 교통표지판 현장적용 설치 계획/설치 • 추적형 집광장치 현장적용 설치 계획/설치	- 입체표지판 외부조명기구를 이용한 실험을 위해 한국건설기술연구원 복층터널 실물 실험체에 설치 - 등기구 밝기에 따른 높은 휘도 값에 대한 추가적인 CASE 실험 - 입체표지판 설계/시공/유지관리 초안 작성 : 한국건설기술연구원 터널실험동 설치 사례를 바탕으로 설계/시공/유지관리 가이드(안) 작성 (2018.03중 초안) - 추적형 조명시스템 실규모 설치(설치 위치 : 한국건설기술연구원 터널실험동 복층터널 구간(30m)) - 설치계획완료 및 2차 실규모 실험설치(2018.02월 설치완료) - 외부조명식 교통표지판 현장적용 추진(적용구간 : 성남시청관내 교통표지판), 관공서 협의 완료 및 설치 사이트 조사 - 추적형 집광장치 현장적용 추진(적용구간 : 횡성군 또는 제천시 상하수도처리장 지하공동구/ 2018.03월 설치완료)

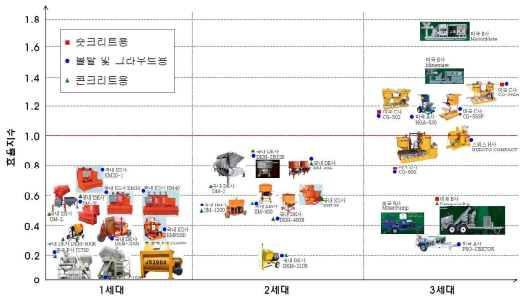
핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
	5차 년도	• 외부 조명식 입체표지판 및 교통표지판 타입별 외부조명 실험 및 설계/시공/유지관리 가이드안 (2차) 수정보완 연구 • 외부 조명 교통표지판 경제성 검토 연구 • 현장적용 사이트 조사 및 시범설치 계획 추진 연구	-외부조명식 입체표지판 타입별 외부조명 실험 수행 -외부 조명 교통표지판 경제성 검토 연구 : 최적 실험 완료 및 설치 금액에 따른 경제성 검토 완료 -현장적용 사이트 조사 및 시범설치 계획 추진 연구
	6차 년도	• 외부 조명식 입체표지판 및 교통표지판 타입별 외부조명 실험 및 설계/시공/유지관리 가이드안 (2차) 수정보완 연구 • 외부 조명 교통표지판 경제성 검토 연구 • 현장적용 사이트 조사 및 시범설치 계획 추진 연구	- 외부조명식 교통표지판 매뉴얼 작성 완료 - 외부조명식 교통표지판 도봉구청 관내시범설치 적용 완료 - 내부조명식 입체표지판 및 친환경 조명시스템 Test Bed 시범설치(경기도 연천내 복층터널) 적용완료 - 다기능 조명 시스템 시제품 제작 : 지하공간 태양광조사 및 지중환기/디자인을 갖는 조명시스템 개발
복층터널 운전자 친화설계 기술개발 및 가상프로젝트 (엔세라텍)	4차 년도	• 터널에 적용되는 마감재, 불연재료와 도료의 품질기준 조사 및 적합한 도장기준 분석 • Lab.테스트를 통해 최적의 배합비 도출 • 품질테스트로 정량적 목표달성 (중금속함유량0.05무게%(500mg/kg) 이하, 1000℃ 유독가스 무배출)	•특허 출원(총 1건) 터널 및 콘크리트용 무기계 불연도료 제조방법 및 그것의 조성물(출원번호 : 1020180026672) • 공인성적서 - 중금속 및 VOC 함량 테스트 : 한국화학융합시험연구원 -건축마감재의 난연성능 기준 불연재료(불연성, 가스유해성) : 한국건설산업품질연구원 - 한국도로공사 터널내오염도장 기준 화재안전성(열방출률, 연기독성, 연기밀도, 화염확산) : 방재시험연구원, FITI시험연구원
복층터널 최적화 설계 기술 개발 ((주) 골든엔지니어링)	3차 년도	• 가상프로젝트 적용을 위한 연구성과 자료 획득 • 문헌자료 조사 및 분석	- 복층터널 설계 및 시공사례 조사 - 연구단 연차별 연구성과 분석 - 연구성과 적용성 분석
	4차 년도	• 가상프로젝트 기본설계 계획수립 • 가상설계를 위한 SITE 선정 및 현황 분석	- 가상프로젝트 구간 선정(경부고속도로 하부 통과구간)
	5차 년도	• 가상프로젝트 수행 • 복층터널 단면 선정 • 굴착, 지보설계, 라이닝, 슬래브 등 연구단 연구성과 반영 • 가상프로젝트 성과품 작성	- 가상설계 터널단면 선정 및 분기구간 설계  <본선단면> - 터널내 분기구간 계획
	6차 년도	• 시공시뮬레이션 수행 • 가상프로젝트 성과물을 중심으로 시공시뮬레이션 수행	- 타 프로젝트 시공시뮬레이션 조사 - 가상프로젝트 성과물 반영 - 연구단 연구성과와 연계한 시공시뮬레이션 구현

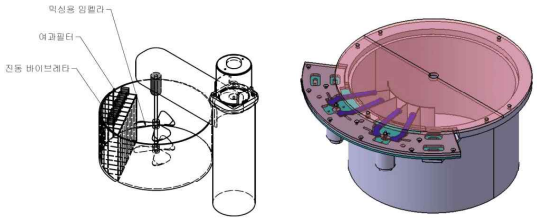
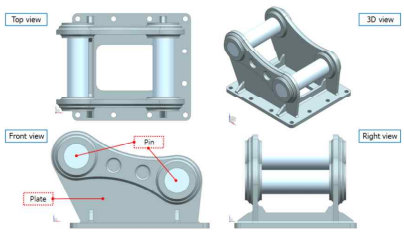
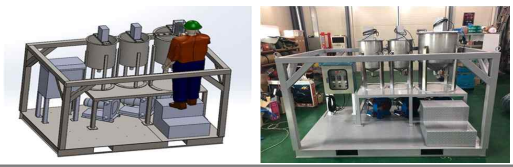
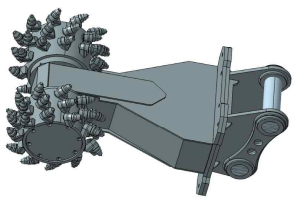
■ 복층터널 다목적 활용 설계 및 운영 기술

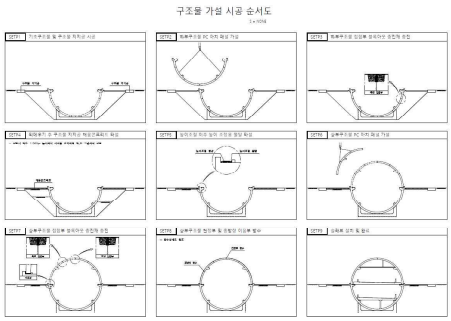
핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
복층터널 최적화 설계 기술 개발 (다산컨설턴트)	2차 년도	• 기존 국내외 도로 터널 및 수로터널 설계기준 검토 • 국내 풍수해 현황 파악 • 종단경사 및 단면 배분에 따른 유량 검토를 통한 최적 수로 전환 단면 선정	• 복층터널의 다목적 활용을 위한 조합설계기준 정립 및 가이드라인 제시 • 다목적 복층터널 입지선정 기준 정립
	3차 년도	• 도시 지하공간 침수피해 실태조사 및 원인 분석 • 도시 지하공간 긴급대응방안 국내외 사례조사 • 관련 법령 조사 • 수방설비 사례 분석 • 기존 도로 및 수로터널 운영시 관리 기준 분석 • 유지관리 계획 정립 • 기능별 유지관리 요소 기술 정립 • 통제기준 정립	• 기능 전환 기준 및 기술 확보 • 기능별 유지관리 방안 • 다목적터널 운영시 기능전환 및 유지관리 가이드라인 제시
	4차 년도	• 도로 및 수로터널 계측 사례 조사 • 유지관리계측 관련 특허 현황 조사 • 도로 및 수로 터널 안정성 평가 기준 분석 • 안정성 평가시 계측 활용 사례 분석 • 대심도 복층터널 계측계획 수립 • 도로의 수로 전환시 계측 시스템 애요 • 계측관리 프로그램 구성	• 계측 사례 및 관련 기술 조사 • 도로 및 수로 전환 시 계측 수립 • 도로의 수로 전환 시 계측시스템 개발
다기능 터널의 기능조합 유지와 복원력 회복 연구 (건국대학교)	1차 년도	• 국내·외 복층터널 건설사례 분석 및 최신 연구동향 조사 • 복층터널의 구조적 기능에 따른 조합조건 분석 • 사용기능에 따른 영향 및 리스크 인자 분석	- 복층터널 사례 국내 2건, 국외 8건 분석 - 대심도 복층터널에 적합한 기능조합 방안으로 “수로+도로” 조합 제시 - 기능전환에 따른 지반 공학적 리스크 인자 분석 - 중점관리 리스크 인자로 “Hydro pressurized tunnel”, “수위변화에 따른 구조물 거동”, “침전물 퇴적으로 인한 배수시스템 저하”를 제시
	2차 년도	• 기능전환 조건에 따른 구조물 안정성 평가 • 대심도 조건 복층터널의 부력영향검토 • 방배수 체계 제안	- 중점 관리 리스크 인자로 제시된 “Hydro pressurized tunnel”에서 주요 누수지점 분석 - 모형 라이닝 하중재하실험을 통한 주요누수지점 예측 및 유지관리 필요성 제시 - 운영 중 라이닝 주변 열화로 인한 터널구조물 부력 영향의 수치해석적 검토 - 모형실험을 통한 기능전환에 따른 터널주변지반 강성저하 분석 - 배수형 터널로의 건설이 불가피한 다목적 터널에서 터널 → 지반으로의 물의 흐름을 방지하는 역류방지장치 제안
	3차	• 다기능 터널의 기능전환에 따른	- 기능전환에 의한 내부수위 변화와 외부 지하수위 변화에 따

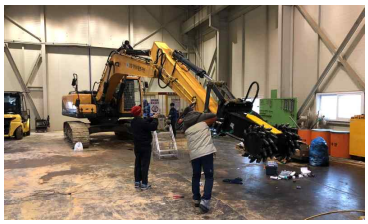
핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
	년도	수리영향 평가 • 다기능 터널의 잔류수압 적용기준 평가	른 터널 거동분석 - 배수공과 배수층 열화에 의한 잔류수압 영향분석 및 잔류수압 설계모델의 적용기준 검토
	4차 년도	• 기능별 복원력 저감요인과 회복 대책	- 모형시험 및 시뮬레이션 분석을 통한 터널 배수시스템의 수리적 열화거동 분석  - 입자 유출거동의 역학적 분석을 통해 라이닝 균열에 의한 지반 공동발생 요인 조사 - 복층터널 손상 및 복원력 저하 시 증진방안 제안
	5차 년도	• 복층터널 복원력 유지를 위한 가이드라인 작성	- 도로/수로 기능전환을 고려한 다목적 복층터널의 설계 및 유지관리 측면에서의 복원력 관리 가이드라인 작성
	6차 년도	• 복층터널의 기능전환시 복원력 유지를 위한 역류방지장치의 시제품 제작 및 성능검증	- 역류방지장치 시제품 제작 '역류방지용 덮개 등을 구비한 역류방지장치'에 대한 시제품 제작 - 현장조건을 모사한 모형시험기 제작 및 시험을 통한 적성성 검토 - 현장 적용성 검증(현장 섭외 - 지하철 8호선 연장)
수로겸용 복층터널의 수방기법 및 통수능 검토 기술 (호서대학교)	1차 년도	• 수로겸용 복층터널의 설계 기반 기술 개발을 위한 현황 조사 및 검토 • 도심지 터널의 침수피해 유형 조사 • 수로겸용 복층터널의 건설 현황 및 설계 기법조사 및 분석	- 수로겸용 복층터널의 설계기반 기술개발을 위한 현장 조사 및 검토, 도심지 터널 침수피해 조사, 수로겸용 복층터널 건설형황 및 설계 기법 조사 분석 - 유일한 수로겸용 터널인 말레이시아 SMART 터널에 대하여 자료조사 및 연구
	2차 년도	• 터널 내 수재해 발생시 재난 대응체계 구축 • 수리학적 통수능 검토를 위한 수리실험	- 복층터널 내 수재해 최소화를 위한 배수시스템 제안 - 수리실험을 통한 수리학적 통수능 검토 및 흐름저항 인자 도출
	3차 년도	• 수치해석을 위한 모형구축 및 6가지 유량에 따른 수치모의 수행	- 수리모형실험, 수치해석을 하여 얻은 Flow-3D 결과 비교 및 검토를 통한 비원형 단면의 마찰손실 계수 제안
	4차 년도	• EPA-SWMM 모형을 이용한 대상지역 유출 특성 분석	- 수로겸용 터널 내부시설 방수기능 향상 기술 개발, 도시유역 강우-유출모형 구축을 통한 터널 유입량 결정 알고리즘 개발
	5차 년도	• 강우 유출 시나리오 개발	- 도시유역의 우수관망을 터널로 가정하여 차수 및 우수관망 특성 분석
	6차 년도	• 강우 유출 시나리오 고도화	- 터널 내 유출 시나리오 분석 및 개발 - 복층터널 내 배수시스템 개발 및 자동화 시스템 적용

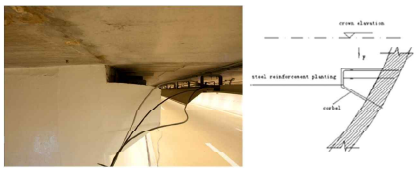
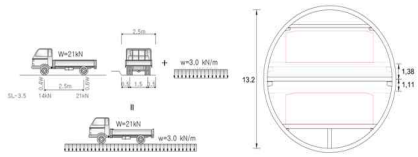
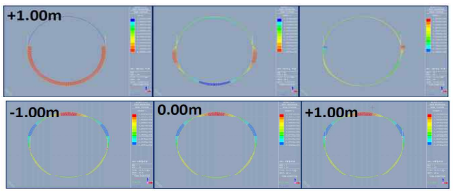
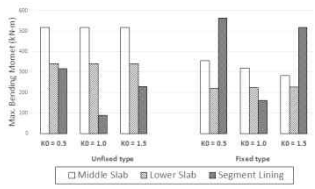
■ 복층터널 최적화 시공을 위한 굴착 · 보강, 구조체 구축 및 유지관리 기술 개발과 Test-bed

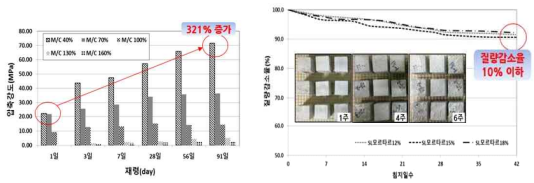
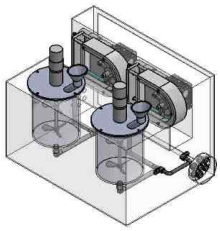
핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
복층터널 최적화 시공을 위한 굴착 기술개발 및 Test-bed (한국건설 기술연구원)	1차 년도	• 국내 · 외 그라우트 믹서 기술 조사	- 국내 · 외 그라우트 믹서 기술 조사를 통한 연구목표 설정 : 3.5㎡ 이하의 체적을 가지는 1.5액형 그라우트 믹서 장비를 목표로 함 
	2차 년도	• 소형화 그라우트 믹서 개념 설계	- 그라우트 주입성능 실내시험 결과(마이크로시멘트 사용 조건) • 막힘 현상이 발생한 경우 : 균열 폭에서 통과한 유량은 물의 유량대비 약 14.4% 임 • 막힘 현상이 발생하지 않은 경우 : 균열 폭에서 통과한 유량은 물의 유량대비 약 49.3% 임 - 기능 향상 방향 설정 • 배합속도 조절 및 입자 응집성 저감을 위한 장치를 소형화 그라우트 믹서 설계에 반영함 - 소형화 그라우트 믹서 설계(안) 작성
		• 커팅헤드 어태치먼트의 설계 기술 조사 · 분석 및 픽커터 작용력 설계 모델 개발 • 커팅헤드 어태치먼트의 설계 기술 조사 · 분석 및 픽커터 작용력 설계 모델 개발	- 국외 커팅헤드 어태치먼트 설계기술 조사 및 분석 • 커팅헤드 어태치먼트의 경우 종방향에 비해 상대적으로 높은 반력을 얻을 수 있는 횡방향 커팅헤드가 유리하고 커팅헤드 어태치먼트의 동력에 따라 셔블계굴착기의 중량 선택이 중요 - 픽커터 작용력 설계모델 개발을 위한 선형절삭실험 42개 조건 수행 • 절삭간격이 넓어질수록, 그리고 커터의 삽입재의 직경이 커질수록 평균 커터작용력은 커지는 결과를 나타냄
		• 확폭 · 분기부 세그먼트 설계사례 및 인자 조사 분석	- 쉴드터널 내 확폭 · 분기 사례 조사(일본 35개 현장 사례) - 쉴드터널 확폭 · 분기부 예비 수치해석 검토 • 지반의 변위가 수렴한 후 Box 구조물의 설치가 이루어져 Box 구조물은 지보로의 역할을 하지 않음 • 최대 변위의 발생은 분기부 시작점에서 약 200m 부근으로 나타남 • 분기부 굴착으로 인해 세그먼트에 작용하는 축력은 1.8 ~ 1.9배 증가하는 거동을 보임

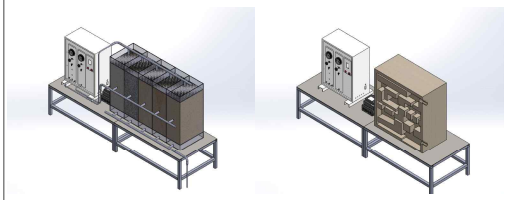
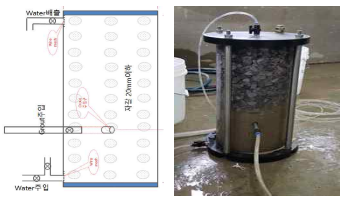
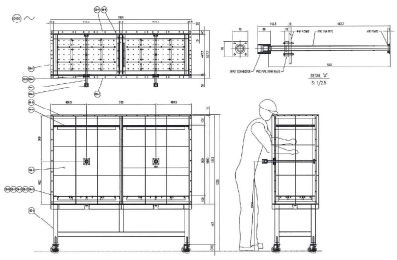
핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
	3차 년도	• 소형화 그라우트 믹서 시제품 설계(안) 검증	- 소형화 그라우트 믹서 설계(안) 검증 • 진동필터가 설치된 소형 그라우트 시제품 제작  • 저속 교반 시 진동필터가 설치되지 않은 교반시료 대비 고속 교반 시 진동필터 사용 시료의 강도 약 24% 증가 확인
		• 커팅헤드 어태치먼트 모의 설계	- 어태치먼트의 제원에 대한 데이터베이스를 구축하여 셔블계 굴착기 중량에 따른 커팅헤드 어태치먼트 제원 결정식 도출  - 커팅헤드 어태치먼트의 픽커터 배열방법 제시
		• 확폭/분기부 수치해석 기법을 통한 구조적 안정성 검토	- 부재력이 집중되는 부분은 분기부의 우각부 쪽이며 이러한 단면력이 발생되는 원인은 상부슬래브의 총지간장이 17m에 이르는 큰 지간구성에 기인함 - 벽체 높이도 12.4m로 수직 및 수평토압과 수압에 의한 과도한 힘이 발생하는 구조로 판단되어 보강 등 개선 방안 필요
	4차 년도	• 소형화 그라우트 믹서 시제품 제작	- 소형화 그라우트 믹서 시제품 제작 • 기존 3조식 믹서(7㎥) 대비 체적 약 37% 수준의 시제품 제작 
		• 커팅헤드 어태치먼트 설계	- 26톤급 셔블계 굴착기를 대상으로 커팅헤드 어태치먼트의 주요부품 및 전체 설계 수행 - 커팅헤드 어태치먼트의 현장 성능평가(유압, 진동, 마모 등 측정) 
		• 확폭/분기부 수치해석기법을 통한 구조적 안정성 검토	- 쉴드터널 확폭/분기부 시공을 위한 부분 강재+RC 합성세그먼트 및 확폭/분기부 구조적 안정성 검토 - 부분 강재+RC 합성세그먼트를 활용한 확폭/분기부 구조적 안정성 검토를 위한 시험체 설계

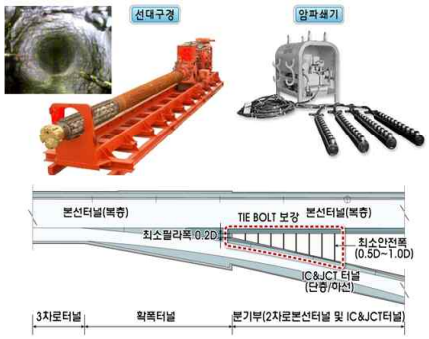
<table>
<tr><th colspan="2">핵심
기술명</th><th>연구개발 수행 내용</th><th>연구 결과</th></tr>
<tr><td rowspan="3"></td><td rowspan="2">5차
년도</td><td>• 소형화 그라우트 믹서 시제품 성능평가 시험 및 개선방안 제시</td><td>• 소형화 그라우트 믹서 시제품 성능 평가
- 기존 실험 대비 그라우트 주입 성능 향상 확인
• 소형화 그라우트 믹서 시제품 개선(안)
- 재료 투입 수월화를 위한 높이 축소
- 경량화를 위한 부피 축소
   </td></tr>
<tr><td>• Mock-up Testbed 구조체 설계(안) 제시</td><td>• Mock-up Testbed 구조체 설계(안) 제시
  </td></tr>
<tr><td rowspan="2">6차
년도</td><td>• 소형화 그라우트 믹서 시제품 성능평가</td><td>• 소형화 그라우트 믹서 시제품 성능 평가
- 지반모형장비를 이용한 주입성능 시험
• 소형화 그라우트 믹서 최종 시제품</td></tr>
<tr><td>• Mock-up Testbed 구축</td><td>• Mock-up Testbed 구축
- 한국건설기술연구원 연천 SOC통합센터 내
  </td></tr>
</table>

핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
복층터널 확폭 및 분기부 굴착장비 제작 (영일공업)	2차 년도	• 커팅헤드 어태치먼트 제작을 위한 유관업체 조사	- 국내 · 외 커팅헤드 어태치먼트 유관업체 11건 Report 작성
	3차 년도	• Head W.A 시제품 1건 (20 톤급 굴착기용)	- Head W.A 시제품 1건 제작(20톤 굴착기용) 
		• 유압 200 bar 이상 검토	- 회로구성 및 시제품 제작
	4차 년도	• Head W.A 시제품 1건 (20 톤급 굴착기용)	- Head W.A 시제품 1건 제작(20톤 굴착기용) 
		• 유압 200 bar 이상	- 회로구성 및 시제품 제작(계속)
	5차 년도	• 확폭분기부 굴착장비 시제품 현장 검증	• 확폭분기부 굴착장비 시제품 현장 검증('18.12.05)  
	6차 년도	• 확폭분기부 굴착장비 시제품 현장 검증	• 수정 시제품 현장 검증('19.08.29-30.) - 건설기계부품연구원 내 

핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
복층터널 슬래브를 고려한 고성능 터널 라이닝 (지윤이앤씨)	1차 년도	• A86, M30, SMART, 상하이 양쯔강 터널의 사례 조사 분석	- A86, M30, SMART 터널, 상하이 양쯔강 터널의 사례 조사를 통한 복층터널 슬래브 라이닝 특성 확인
		• 복층터널 구조 특성 분석	- 복층터널 구조 특성 비교 분석 
	2차 년도	• 중간슬래브 하중 특성 및 영향 그리고 그에 따른 세그먼트 라이닝 거동 분석	- 해석을 위한 증간슬래브 하중 특성 검토 및 분석  - 해석 프로그램을 이용한 중간슬래브 하중 영향 분석 - 브라켓 위치에 따른 복층터널 세그먼트 라이닝의 거동 분석  - 측압계수에 따른 복층터널 세그먼트 라이닝의 거동 분석 
	3차 년도	• 브라켓 연결형식에 다른 세그먼트 라이닝 거동분석	- 세그먼트 라이닝과 슬래브 연결형식에 따른 복층터널 역학적 거동 분석 • 슬래브 및 세그먼트 라이닝을 종합적으로 비교한 결과 분리형이 고정형(강결형)에 비해 더 경제적임 
	4차 년도	• 중간슬래브 및 하부슬래브의 연결형식에 다른 세그먼트 라이닝 거동분석 • 세그먼트 보강재에 따른 실규모 시험체 제작 및 성능평가	- 중간슬래브 및 하부슬래브와 세그먼트 라이닝 간의 연결형식에 따른 복층터널의 역학적 거동 분석 - 프리캐스트 세그먼트 라이닝의 보강재(철근, 강성유, 합성섬유)에 따른 실규모 시험에 의한 성능평가 

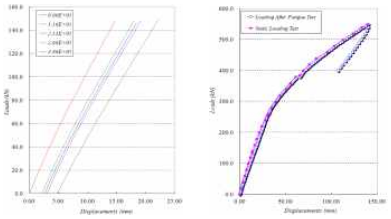
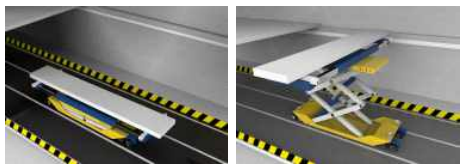
핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
	5차 년도	• 고성능 복합 터널 라이닝 세그먼트몰드 제작	• 비용절감형 브라켓 일체형 세그먼트 제작을 위한 몰드 시제품 제작 
	6차 년도	• 고성능 복합 터널 라이닝 세그먼트 제작 및 Test-Bed 적용	• 브라켓 일체형 세그먼트 시제품 제작 및 Test-Bed 설치 검증 
복층슬래브 타설체 보강을 위한 그라우팅 재료 개발 (제이엔티아이엔씨)	1차 년도	• 국내·외 터널 그라우팅 기술 조사 및 공법별 특성 분석	- 터널 차수보강 그라우트 재료 특성 검토 - 복층터널 슬래브 보강 그라우트 재료 특성 검토 - 그라우팅 주입공법 분석을 통한 개선방향 수립 - 그라우팅 강도발현 메커니즘 분석
	2차 년도	• 균열부 주입 성능 시험을 통한 그라우트 재료 후보 물질 평가	- 사용목적별 그라우트 재료 특성(비중, 응결 등)분석 - 그라우트 배합별 물리적특성(점도, 응결, 흐름 값, 블리딩율) 분석 및 강도평가 
	3차 년도	• 친환경 그라우트 고강도형 및 급결형 시험체 제작 및 내구성능 평가	- 배합조건별 그라우트 시험체 제작 - 용탈,체적변화, 화학저항성, 장기강도 성능 평가 
	4차 년도	• 그라우트 배합별 주입성능 검토 및 주입형태별 모의부재 시험	- 그라우트 주입성능 검증을 위한 소형주입장치 제작 - 배합조건별 주입성능 평가 수행 

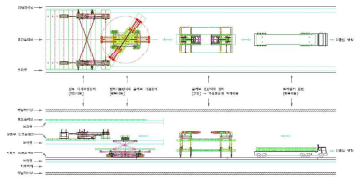
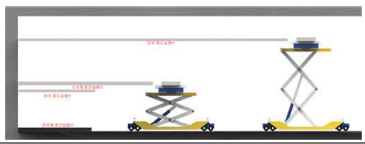
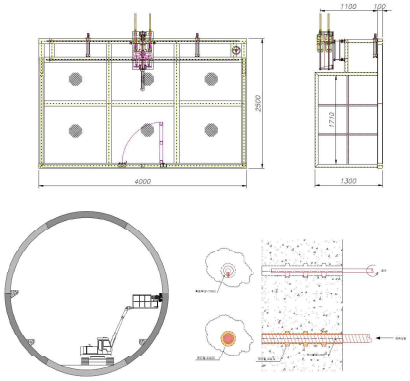
핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
	5차 년도	• 그라우트 재료의 Testbed 적용	• 그라우트 주입성능 검증을 위한 지반모형 설계  • 모형지반 주입성능 시험을 통한 급결성능 확인 
	6차 년도	• 그라우트 재료의 Testbed 적용	• 지반모형을 이용한 재료 성능 검증 
대편평율/변단면 확폭 및 보강기술 개발 (단우기술단)	2차 년도	• 대편평율/변단면 확폭부 터널 안정성 확보를 위한 보강 공법 제시	- 본선 쉴드터널에서 분기되는 확폭부 형상을 박스형 및 아치형으로 가정하고 확폭부에 대한 취약부 및 보강량을 결정하기 위해 2D 수치해석을 수행한 터널 안정성 검토 결과 • 터널 확폭부 보강에 대한 안정성해석 툴 성능 비교 및 분석 • 대단면 지중확폭부 터널의 보강 공법 분석 • 대단면 지중확폭 터널의 안정성 분석
	3차 년도	• 대편평율/변단면 확폭부 터널 안정성 확보를 위한 보강 공법 제시	- 본선 쉴드터널 및 NATM 터널에서 분기되는 확폭부에 대한 취약부 및 보강량을 결정하기 위해서 수행한 3차원 수치해석을 수행하고 터널 안정성 검토 검증 결과 제시
	4차 년도	• 대편평율/변단면 확폭부 터널 안정성 확보를 위한 보강 공법 제시	- 본선 쉴드터널 및 NATM 터널에서 분기되는 확폭부에 대한 취약부 및 보강량을 결정하기 위해서 3차원 수치해석을 수행하고 터널 안정성 검토 검증 결과 제시
	5차 년도	• 대단면 확폭부 보강에 대한 가이드라인(안) 제시	• 대단면 확폭부 보강에 대한 가이드라인(안) 제시 • 대단면 지중확폭부 터널의 굴착 및 시공방법, 취약부에 대한 안정성 및 경제성 분석 결과를 바탕으로 한 최적 굴착 방안 제시

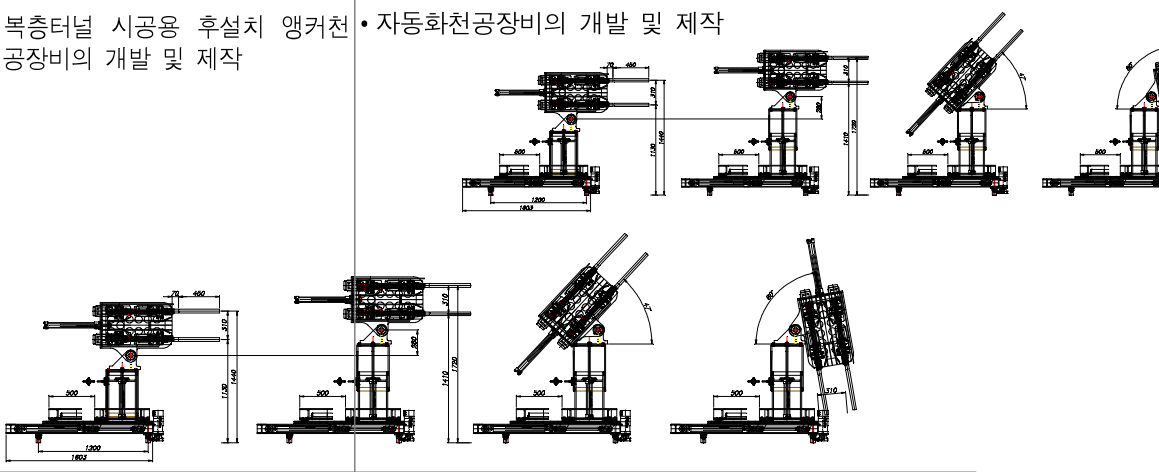
<table>
<tr><th colspan="2">핵심
기술명</th><th>연구개발 수행 내용</th><th>연구 결과</th></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td>• 대단면 확폭부 보강에 대한 굴착 및 보강 방안 제시</td><td>• 대단면 지중확폭부 터널의 굴착 및 시공방법, 취약부에 대한 안정성 및 경제성 분석 결과를 바탕으로 한 최적 굴착 및 보강 방안 제시
 
</td></tr>
<tr><td rowspan="4">복층터널
구조체
시공기술 및
장비 개발
(홍지)</td><td rowspan="2">1차
년도</td><td>• 국내·외 복층터널 시공사례 분석</td><td>- 중간슬래브와 브라켓의 구조형식 사전조사
 

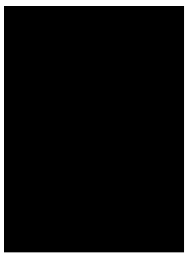
</td></tr>
<tr><td>• 가설용 장비의 현황 조사·분석</td><td>- 중간슬래브의 시공방법 및 시공장비의 사전조사 : 향후 시공방법 및 장비개발의 기술개발 방향 확인
 

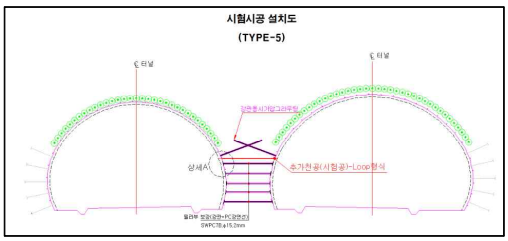
</td></tr>
<tr><td rowspan="3">2차
년도</td><td>• 복층터널 중간 슬래브 현장타설 및 공장 제작기술 분석 연구</td><td>- 중간슬래브 현장타설 및 공장제작기술 분석
<table><tr><th>공법</th><th>현장타설</th><th>공장제작</th></tr><tr><td>시공속도</td><td>2.6m/일</td><td>20m/일</td></tr></table>
• 공정에 따른 사전 제작과 충분한 제작장 확보 시 현장타설 공법의 공사기간을 1/7로 단축할 수 있음</td></tr>
<tr><td>• 슬래브 세그먼트의 종방향 보강기술 개발</td><td>- 중간슬래브 세그먼트의 종방향 연결보강기술 개발과 기존의 습식방식이 아닌 건식방식의 연결방식 개발
 
</td></tr>
<tr><td>• 브라켓 연결공법 및 시공기술 분석 연구</td><td>- 브라켓 연결공법 및 시공기술 분석
• 기존의 현장타설 브라켓과 공장제작 조립식 프리케스트 브라켓의 시공속도 비교</td></tr>
</table>

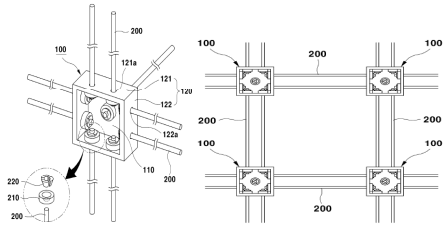
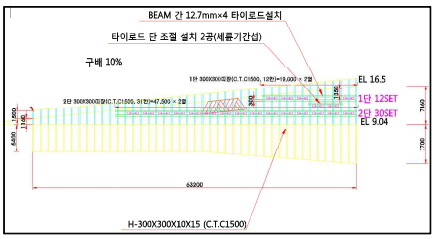
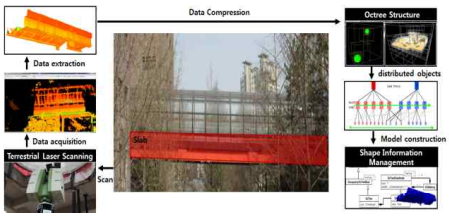
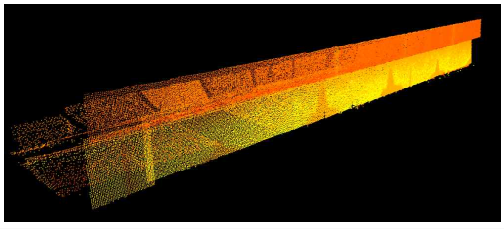
핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
			<table><tr><th>공법</th><th>현장타설 콘크리트공법</th><th>공장제작 PC 공법</th></tr><tr><td>시공속도</td><td>3.375m/日</td><td>70m/日</td></tr></table> ※라이닝 천공작업은 별개  <강재 및 PC브라켓 성능시험> • 기존의 현장타설 브라켓을 대체할 수 있는 공장제작 PC 및 강재 브라켓의 적용성 확인
	3차 년도	• 중간슬래브 횡방향 보강 및 브라켓 시공법 성능평가	- 도로용 중간슬래브 횡방향 이음부 및 프리캐스트 현장조립용 브라켓의 피로 성능평가  < 피로시험(명지대 하이브리드 구조 실험센터) >  < 피로시험 결과 > • 시공속도 향상을 위해 개발된 중간슬래브의 건식 고장력 볼트이음부와 프리캐스트 브라켓의 앵커정착부에 대한 피로시험(38.8만회)을 통해서 구조적 안정성 검증
		• 시공속도 향상형 중간슬래브 가설장비 제작	- 복층터널을 구성하는 PC 중간슬래브의 시공을 좀 더 신속하고, 안전하게 수행할 수 있는 가설장비 개발  < HLE-D2S 장비 >
	4차 년도	• 시공속도 향상형 중간슬래브 가설장비 제작 및 성능시험	- 복층터널을 구성하는 PC 중간슬래브의 시공을 좀 더 신속하고, 안전하게 수행할 수 있도록 개발된 가설장비의 제작 

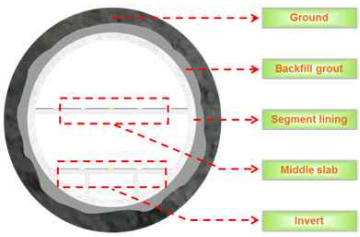
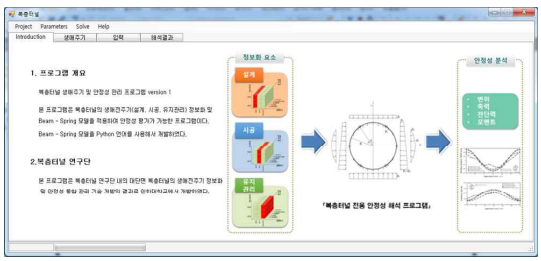
핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
			< 회전/인상 가설장비 >  < 중간슬래브 운송장비 >< 중간슬래브 상부조정장치 >
		• 복층터널 중간슬래브의 제작 및 기계화 시공지침서 작성	- 중간슬래브 시공계획서를 통한 제작 및 기계화 시공기술 개발 • 효율적인 장비연속화 시스템을 통한 시공속도 향상  • 환기용 및 도로용 중간슬래브 가설을 동시에 시공 
		• 브라켓 시공을 위한 라이닝 천공장비의 개발 · 제작(제작완료 5차년도)	- 프리캐스트 라이닝과 연결되는 RC 및 PC브라켓 시공을 위한 매립철근이나 후설치 앵커용 천공장비  • 차량진행방향으로 이동하며 연속 천공작업이 가능하도록 제작 • 후설치 앵커의 인발력을 증진시키기 위한 천공비트를 개발하여 반영
	5차 년도	• 중간슬래브 시공기술확립	• 복층터널을 구성하는 도로용 중간슬래브의 시공을 보다 신속하고, 안전하게 수행할 수 있도록 개발된 가설장비(HLE-D2S)을 합리적으로 운영하기 위한 방안을 제시 • 중간슬래브의 가설장비 개발로 시공속도를 60m/일로 시공이 가느능할 것으로 판단되며, 터키 유라시아 터널의 현장타설공법의 경우(12m/일)와 비교하여 약 5배의 시공속도 상승이 가능할 것으로 판단되며, 동부간선도로 지하화공사에 크레인을 이용한 설치속도(40m/일)과도 약 50%이상의 시공속도 향상이 가능

핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
			표 6.1 중간슬래브 시공속도의 비교 곡 벽 | 현장타설공법 | 프리캐스트 공법 (크레인 | 전용가설장비) 시공속도(일) | 12m/일 | 40m/일 | 60m/일 비 | 1.0 | 3.3 | 5.0
		• 복층터널 시공용 후설치 앵커천공장비의 개발 및 제작	• 후설치 앵커의 최상에 성능을 발현하기 위한 천공홀의 다양한 형태에 대해 실험을 수행  그림. 천공 및 앵커 설치 • 후설치 앵커에서 내부를 확공하여 주입재가 충분히 충진된 경우에서 가장 큰 인발력을 보임 • 자동화천공장비의 개발 및 제작 
		• 복층터널 중간슬래브 유지보수방안제시	• 복층터널 중간슬랩의 교체공법은 손상된 부분만을 제거하여 새롭게 콘크리트를 타설하여 손상을 받지 않은 부분과 같은 정도의 기능으로 회복하는 공법으로 부분교체 공법과 부재를 전면적으로 교체하여 회복시키는 전면공법 
	6차 년도	• 중간(풍도)슬래브와 브라켓 등의 PC제품 제작	• 중간 및 풍도 슬래브를 공장에서 PC 제품으로 제작 하여 공기단축 및 품질안정화에 기여 - 현장타설 브라켓을 대체하기 위해 PC브라켓과 강재브라켓 2종류로 설계/제작

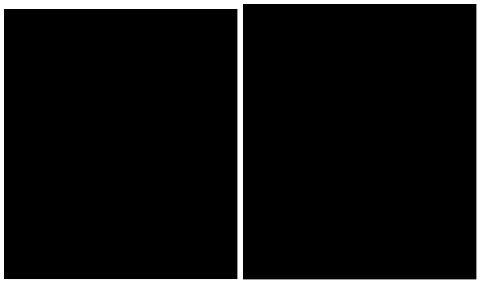
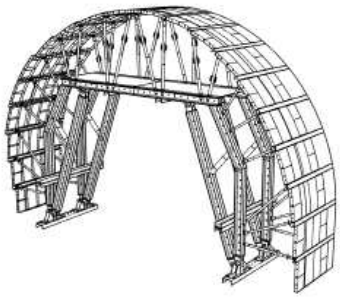
핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
			 
		• 중간슬래브 공법의 장비반영/성능검증	• 중간슬래브 가설장비, 문형크레인 및 거치된 슬래브간의 연결을 위해 최종위치를 미세조정 할 수 있는 상부조정장치로 구성 - 기존의 크레인 가설 등에 비해 시공속도까 40%이상 빠를 뿐만 아니라 안전사고 예방에 있어서도 우수  
		• 브라켓 시공용 후설치 앵커천공장비의 개발 및 제작	• 중간슬래브의 하중을 터널라이닝에 전달하는 브라켓구조를 시공하기 위하여 설치되는 매입 철근이나 앵커를 라이닝에 연속적으로 천공이 가능 - 앵커 천공장비를 이용하여 강재브라켓과 PC브라켓을 시공/성능검증  
		• 실규모 복층터널 TEST BED 구축계획 설립(중간슬래브 설치 및 하부슬래브 연결도로 구축)	• 실규모 복층터널을 구현한 연구성과물의 적용성 평가 및 타당성 검증 - 하부/중간/풍도 슬래브 설치(장비 반영 및 성능 검증) - 하부슬래브 진입로 구축(추가 반영)

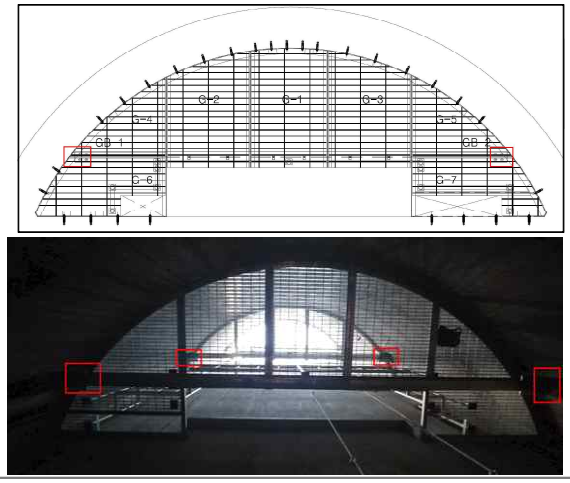
핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
			
취약 특수부(분기부/유출입부) 안정성 확보 기술 개발 (롯데건설)	1차 년도	• 국내 · 외 사례 3개 조사	- 일본 츄오간조시나가와선 오바시 연결로 공사 지중 분/합류부 조사 - 동순천광양 석정터널(철도) 지중분기부 조사 - 부산-거제간 연결도로 중죽도 터널 조사
		• 유사특허 3건 분석	- 근접 병설터널 시공방법 및 그 시공에 이용되는 필러부 압축구조물/성우사면 특허 분석 - 충격 차단공과 철근-숏크리트를 이용한 근접병설터널 시공방법/하이콘 특허 분석 - 거더지보재와 가압패널을 이용한 필라 지지구조체/서영 특허 분석
	2차 년도	• 국내 · 외 사례 2개 조사 및 국내 · 외 보강사례 2개 분석	- 일본 신주구선 분 · 합류부 터널 사례 - 일본 시나가와선 터널 횡연락갱 U턴로 사례 - 일본 시나가와선 고탄다 출입구 보강사례 분석 - 요코하마 환상북선 보강사례 분석
		• 암반등급 및 분기부 이격에 따른 보강해석 3건 이상	- 화도-양평 1공구 원안설계 해석 - 화도-양평 1공구 보강설계 해석 - 3차원 해석
	3차 년도	• 기존기술과 지보량 비교	- ○○역~○○로간 연결도로 터널 근접 필라부 개발보강재 시험시공 비교 
		• 기존기술과 시공성 비교분석	- ○○역~○○로간 연결도로 터널 근접 필라부 개발보강재 시험시공 비교
	4차 년도	• 기존 필라 보강 기술 대비 수평 변위량 2% 향상	- 수치해석을 통한 터널부 분기부 필라 보강 시 구조적 안정성 확보방안 분석 - 수치해석을 통한 터널부 유출입부 보강 시 구조적 안정성 확보방안 분석 - ○○역~○○로간 연결도로 터널 유출입부 개발보강재 시험시공 비교 

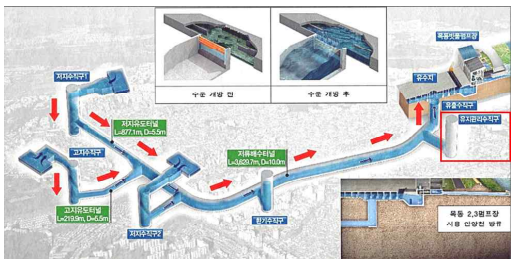
핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
		• 기존 필라 보강 기술 대비 10% 공기단축	- 기존 특허 및 현장 시험시공 분석을 통한 특허 보강재 개선 
	5차 년도	• Mock-up TB 또는 시험시공 1건	• 화도-양평 o공구 oo터널 취약부 개발보강재 시험 시공 • 터널 취약부 지반 보강 관련 특허 2건 출원
	6차 년도	• Mock-up TB 또는 시험시공 1건	• 대치 o지구 가설 램프 취약부 개발기술 시험 시공  • 취약부 지반 보강 관련 특허 1건 출원
복층터널의 내부형상 모니터링 및 관리 기술 개발 (성균관대학교 산학협력단)	1차 년도	• 국내 · 외 교량/터널 모니터링 및 처짐 측정 연구사례 조사 및 분석	- 기존 형상계측기법 동향분석을 통한 복층터널 내부형상계측 기법 선정 • 교량/터널 형상 모니터링 기술 분석 • 교량/터널 처짐 및 변형 기술 분석 • 기술 동향 보고서 작성
	2차 년도	• 3D 레이저 스캐닝을 이용한 교량 구조물 계측실험 수행	- 3D 레이저 스캐닝을 이용한 내부형상모델 구축 • 교량 슬래브 대상 계측수행 및 계측 프로세스 정립 • 3차원 형상모델 계측데이터의 영역 그룹화 및 세분화 
	3차 년도	• Octree Data Structure 기반 형상정보 시각화 알고리즘 개발	- 내부형상정보 시각화 알고리즘 개발 • Octree기반 형상정보 시각화 알고리즘 개발 • 구조물 형상정보 가시화 프로그램 제작 및 등록 (등록번호 C-2016-022475) 

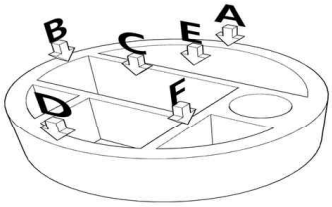
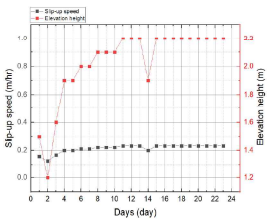
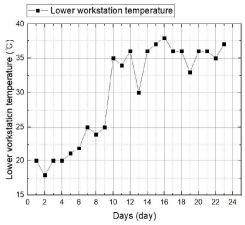
핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
	4차 년도	• 실교량 현장실험을 통한 복층터널 형상관리 성능검증	- 레이저스캐닝을 이용한 실교량 처짐 값 추정 현장실험 실시 • 교량 재하실험 진행 및 레이저스캐닝 형상변화 분석(교량 : 충남 논산시 광석면 노성대교) - 노성대교 교량 상부 차량재하  - LVDT 변위계 설치(좌) 및 레이저스캐닝 현장계측시험 
대단면 복층터널의 생애전주기 정보화 및 안정성 통합 관리 기술 개발 (인하대학교 산학협력단)	2차 년도	• 지하구조물 건설에 사용되는 BIM 최신 동향 분석 및 복층터널 공간 및 구조별 성능 중심의 체크리스트 정보화	- 토목분야 BIM 프로그램, BIM 발주동향 및 적용사례 분석 • 복층터널 시공 시 비용절감, 성능향상 및 유지관리를 위해서 정보화가 필요함 - 복층터널의 설계 및 시공 단계에서의 구조별 성능중심의 체크리스트 정보화 • 복층터널 구조해석 및 안정성 분석 수행 시 고려할 사항과 복층터널 공간 및 구조별 성능중심의 유지관리 가이드라인(체크리스트)의 근간 제시
	3차 년도	• 도출된 복층터널의 생애전주기 성능중심의 체크리스트를 반영한 복층터널의 안정성 빔-스프링 모델 해석 및 신뢰성 비교 검토	- 빔-스프링 모델을 활용한 복층터널 구조해석 모듈 개발 • 중간슬래브의 지지방식에 따른 복층터널 안정성 분석 • 터널심도에 따른 복층터널 안정성 분석 • 지반탄성계수에 따른 복층터널 안정성 분석 
	4차 년도	• 빔-스프링 모델을 적용한 안정성 분석 프로그램 개발 및 복층터널의 생애전주기 성능중심의 체크리스트를 반영한 관리 프로그램 개발	- 복층터널 안정성 분석 및 관리 프로그램 개발 • 개발한 복층터널 구조해석 모듈의 프로그램화 • 복층터널 유지관리 가이드라인(체크리스트)의 내용을 반영한 관리 프로그램 개발 

■ 도심 대심도 수직구의 친환경 시공기술 개발

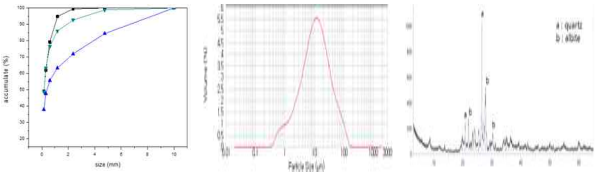
<table>
<tr><td rowspan="4">복층터널 연결 수직구 접속 개구부 및 브래킷 시공기술 개발 (하경 엔지니어링)</td><td>1차 년도</td><td>• 수직구 및 브래킷 형태 시공사례 조사/분석</td><td>- 수직구 및 브래킷 형태 시공사례 조사 결과
  
<전력구(평택> <전력구(성남)>
- 도심지 복층터널용 수직구의 고속 성형장치 개발(4m/일 이상)에 따라 브래킷 시공기술 개발 필요</td></tr>
<tr><td>2차 년도</td><td>• 브래킷 및 가설구조 구조검토 설계 및 설계검토용 3D 모형제작</td><td>- 브래킷 3D 모델링 및 3D 모형 제작
- 가설 접속부 3D 모델링
  
- 도심지 복층터널용 수직구의 고속 시공을 위한 접속부 가설장치 및 브래킷 기본설계 완료
- 모형 및 차년도 성능시험을 통하여 가설장치 및 브래킷 시공기술 개선 필요</td></tr>
<tr><td>3차 년도</td><td>• 브래킷 제작/성능시험 및 가설구조 부분제작/ 부분시험
• 시공순서도 개발</td><td>- 브래킷 1개당 27kN/㎡ 이상 구조 성능
- 브래킷 실내(실외) Mock up 시험
   </td></tr>
<tr><td>4차 년도</td><td>• 브래킷 제작/성능시험 및 가설구조 부분제작/부분시험
• 시공순서도 개발</td><td>- 브래킷 1개당 30kN/㎡ 이상 구조 성능 확인
- 브래킷 실내(실외)Mock up 시험
 
- 횡방향 접속부 가설장치 3D 모델링 수행
  </td></tr>
</table>

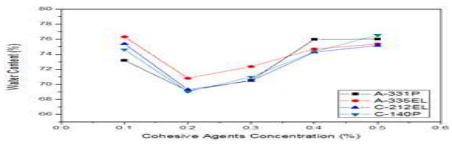
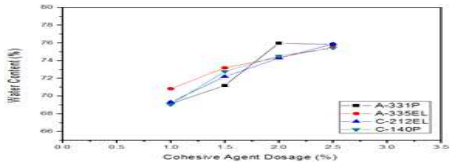
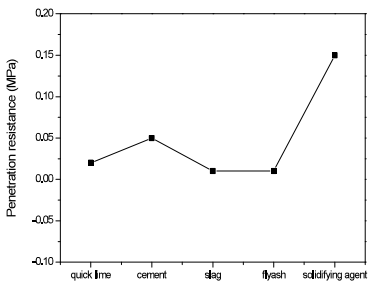
	5차 년도	• 브래킷 및 가설구조 시제품 조립 및 현장 적용성 검증	• 브래킷 및 가설구조 시제품의 현장 시험 적용 
	6차 년도	• 브래킷 및 가설구조 시제품 조립 및 현장 적용성 검증	• 브래킷 및 가설구조 시제품의 현장 시험 적용 - 신월 유지관리 수직구 그레이팅부 
복층터널 연결 수직구 구조물 고속 시공을 위한 장치 및 기술개발 (네오시티)	1차 년도	• 히팅슬립폼 및 수직구 운송장치 시공사례 및 자료 조사 • 복층터널 수직구용 내부 슬래브 및 계단 시공사례 및 자료 조사	- 히팅 일반 강재폼 적용 사례 : 국내 · 외 자료조사 4건 - 승강장치 자료조사 - PC 슬래브 및 계단 자료조사 : 국내 · 외 자료조사 4건 - 도심지 복층터널용 수직구의 고속 시공을 위한 히팅슬립폼 (4m/1일) 및 슬래브, 계단(3m/1일) 시공기술 필요 - 수직구 히팅슬립폼 성형장치 개발
	2차 년도	• 복층터널 연결 환기구 및 통로용 수직구 구조물 설계 및 3D모형제작	- 수직구 구조물 3D 모델링 기본 설계 - 히팅 슬립폼 3D 모델링 및 모형제작 완료 • 복층터널 도로용 설계 사례유사 수직환기구 적용 히팅 슬립폼 모형제작  - 수직구용 작업자 운송 장치설계 - 수직구용 작업자 운송장치 견품 • 수직구 구조물 시공 시 가설계단 철거 후 별도 운송장치 필요 - PC SLAB 3D모델링 및 모형제작 • PC SLAB 경량화 제작 및 조립 - 조립식 철제계단 3D모델링 • 슬래브 연결 계단 조립방식 단순화 개선 - 도심지 복층터널용 수직구의 고속시공을 위한 히팅슬립폼

			및 PC SLAB, 계단, 운송장치 기본설계 완료 - 히팅슬립폼 및 PC SLAB 차년도 구조 성능시험 및 상세 설계 개선필요
	3차 년도	• 히팅슬립폼 부분제작/부분시험	- 히팅슬립폼 부분제작/부분시험(1차) • 강도/수화열/온도 데이터 수집 • 1차 실험 보완사항 반영하여 2차 실험 진행 예정  
	4차 년도	• 히팅슬립폼, 수직구 운송장치 보완 및 시공기술 개선	- 히팅슬립폼 부분제작/부분시험(2~3차) - 강도/수화열/온도 데이터 수집 - 벽체 두께별 양생시간을 고려한 상승속도 최적화 - 최적 상승속도 4m/day 확보 - 외기 온도별 양생시간 측정 - 벽체 두께별 히팅가열온도 최적화   
		• 계단 슬래브 보완 및 시공기술 개선	- 경량 PC 슬래브 시험체 제작 • 연결부 30kN/㎡ 이상 구조 성능 확인  
	5차 년도	• 수직구 구조물의 현장 시험 적용	• 신원 빗물저류시설 수직구 현장의 수직구 시험 적용 

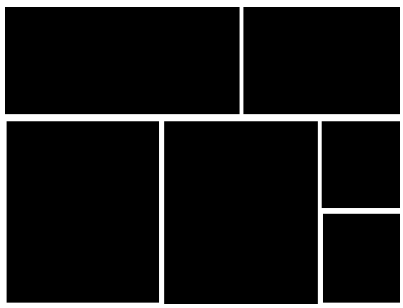
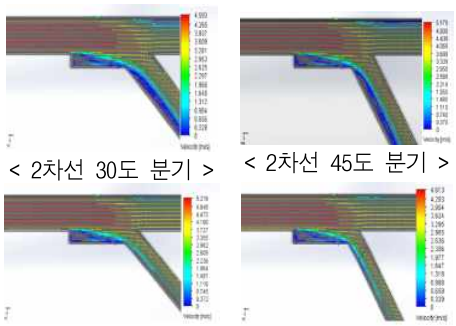
	6차 년도	• 수직구 구조물의 현장 시험 적용	• 신원 빗물저류시설 수직구 현장의 수직구 시험 적용 - 히팅슬립폼 상승에 따른 온도·강도 측정 위치   상승 높이 및 속도  하부작업대 온도 - 약 한달 간 하루 9.5시간 데이터 분석 - 일 평균 상승 높이 : 약 2.03m - 일 평균 상승속도 : 시간당 약 0.214m - 목표치인 4.0m/1day, 0.167m/hr는 만족 - 온도가 높을수록 빠른 속도로 상승  ↑ 철제 계단 아연도금 및 도장 작업 수직환기구용 철제계단 현장 적용 사진 →  

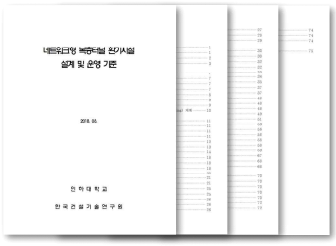
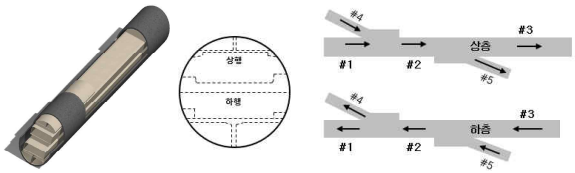
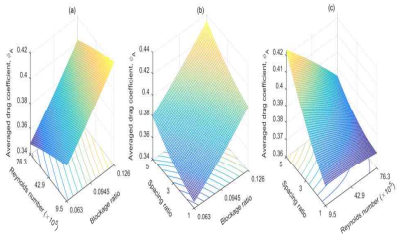
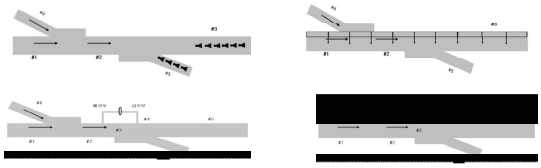
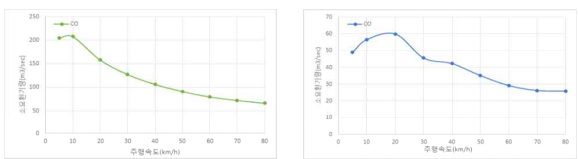
■ 도심 대단면 복층터널 고함수비 굴착버력 친환경 급속처리기술 개발

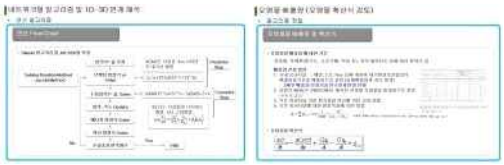
갱내에서의 굴착버력 탈수공법 개발 (포스코건설)	1차 년도	▪ 버력 처리공법 현황 및 문제점 분석	- 쉴드 TBM 굴착버력에 대한 탈수공법은 조사되지 않아 유사한 지반조건에 대한 탈수공법 조사 - 응집제 이용 분리공법, 흡수성 고화제 이용 흡수공법, 진공압 이용 진공탈수공법으로 조사됨 - 갱내와 같이 협소한 장소에서는 응집제 및 진공압 이용하는 적용성 우수
		▪ 굴착버력 성상 분석	- 국내 쉴드 TBM 현장 2곳 굴착버력 샘플링 및 입도/화학조성/구성광물 분석 

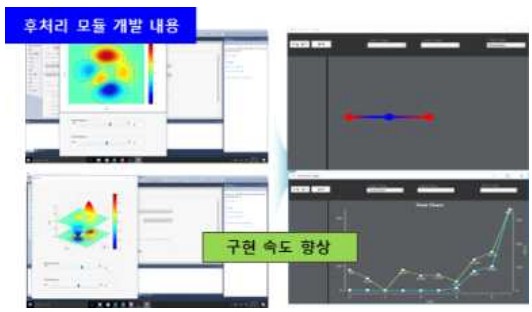
<table>
<tr><td rowspan="2"></td><td rowspan="2">2차
년도</td><td>▪ 버력 성상 예측 기술 개발</td><td>- 실내시험을 통함 함수비 25% 저감 효과 확인
  </td></tr>
<tr><td>▪ 버력 내 함수비 저감 재료 및 급속 고화재료 개발</td><td>- 응집제 농도 변화에 따른 성능 평가 실험 수행
 
- 응집제 투입량에 따른 성능 평가 실험 수행
 
- 필터프레서를 사용하여 함수비 58% 저감 효과 확인</td></tr>
<tr><td rowspan="2">고함수비 굴착버력의 갱외 소규모 장비를 이용한 처리공법 개발 (케미우스코리아)</td><td>1차
년도</td><td>▪ 재료 및 장비 조사</td><td>- 석회계, 시멘트계 및 폴리머계 고화제를 조사하였으며, 모두 급속 고화는 어려운 것으로 조사됨
- 고화제 혼합 장비는 대부분 현장 백호우를 이용하고 있는 것으로 조사되었고, 별도의 장비는 없는 것으로 조사됨
  </td></tr>
<tr><td>2차
년도</td><td>▪ 고화재료 개발 및 성능 평가</td><td>- 고화재료 개발 결과
<table><tr><th>구분</th><th>사용량(kg/m³)</th><th>4시간 관입저항(MPa)</th></tr><tr><td>생석회</td><td>50</td><td>0.02</td></tr><tr><td>시멘트</td><td>50</td><td>0.05</td></tr><tr><td>슬래그</td><td>50</td><td>0.01</td></tr><tr><td>플라이애쉬</td><td>50</td><td>0.01</td></tr><tr><td>개발 고화제</td><td>25</td><td>0.15</td></tr></table>- 개발고화제의 경우 혼합에 문제가 없으면 다른 재료들에 비해 사용량이 적고 운송이 용이함
  </td></tr>
</table>

■ 복층터널 네트워크형 환기설계 및 해석 기술

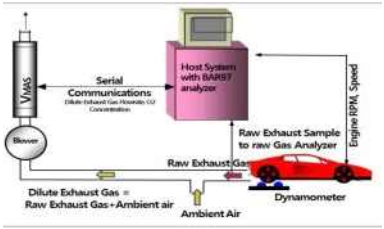
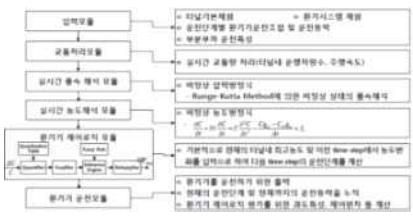
핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
복층터널 네트워크형 환기 설계 기법 및 지침 개발 (인하대학교 산학협력단)	1차 년도	• 국외 복층터널 환기 사례 조사 • 국외 복층터널 종류 및 횡류식 환기 설계 사례 조사 및 분석 • 복층터널 환기설계 아웃라인 검토 • 복층터널 주요 환기설계 인자 검토	- 횡류식 환기설계 터널 사례 조사 - 종류식 환기설계 터널 사례 조사 - 송배풍기 용량 산정, 분기 합류 손실계수, 덕트압력손실, 급배기 덕트 공기량 등 주요 설계인자 도출 - 터널 환기설계 아웃라인 설정 - CFD 분석 및 모형 실험 검토계획 수립
	2차 년도	• 네트워크형 복층터널 분기/합류부 기류 유동 문헌 연구 • 네트워크형 복층터널 분기/합류 충격손실계수 측정을 위한 축소모형 모델 설계 및 제작 • 축소모형 실험 연구를 통한 충격손실 계수 측정 연구	- 분기/합류부에서의 충격손실에 관한 문헌연구 - 상사 법칙을 고려한 축소모형 실험 내 풍속 결정 - 기존 ASHRAE 제시 값 대비 300% 충격손실 계수 측정 - 충격 손실계수에 대한 종횡비 영향 검토 - 충격 손실계수 실험값 검증을 위한 CFD 분석계획 수립  <축소모형 실험을 통한 분기/합류부 충격손실계수 검토>
	3차 년도	• 기존 장대터널 환기설계 지침서를 바탕으로 “네트워크형 복층터널 환기설계 지침” 1차 초안 제시 •충격손실계수 최종 결정을 위한 CFD 해석 및 검증	- 기존 환기시설 설계 기준을 바탕으로 네트워크형 복층터널 환기시설 설계시 보완사항 설정 - 기준배출량, 보정계수 자료 최신화 및 분기/합류부 충격손실 계수 적용 설계식 제시 - 도로용량, 확폭도로 및 분기/합류부 각도를 고려한 충격손실계수 해석 및 검토  < 2차선 30도 분기 > < 2차선 45도 분기 > < 1차선 30도 분기 > < 1차선 45도 분기 > <확폭도로를 고려한 분기/합류부 충격손실 분석>
	4차 년도	• 기존 장대터널 환기설계 지침서를 바탕으로 한 “네트워크형 복층터널 환기설계 지침서” 제시 • 네트워크형 복층터널 case study를 통한 환기설계 사례 분석	- “네트워크형 복층터널 환기시설 설계 및 운영기준” 설계지침 제시 - 소요환기량 산정을 위한 구간별 교통량 보존 및 구간별 반복산정 절차 추가 - 기존 설계지침 소요환기량 산정예시 활용 소요환기량 산정

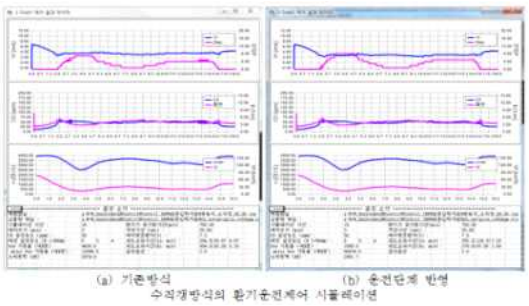
핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
			결과 비교 - 교통량 보존에 따른 네트워크형 복층터널 소요환기량 산정 및 환기력 검토  <네트워크형 복층터널 환기시설 설계 및 운영기준>
	5차 년도	• S/W 활용 모범환기설계 • CFD 분석을 통한 항력계수 영향도 평가	- 네트워크형 복층터널 환기설계 사례 분석 - CFD 해석 및 요인설계법을 활용한 소형차 전용 복층터널 내 주요 요인에 따른 항력계수 영향도 평가 - 항력계수 표면반응모델 예측  <네트워크형 복층터널 환기설계 사례 분석>  <네트워크형 복층터널 항력계수 표면반응모델 예측>
	6차 년도	• 네트워크형 복층터널 모범환기설계 사례집 제시 • 현장적용을 통한 환기설계기법 적용 및 검증	- 네트워크형 구조를 고려한 환기방식별 CASE 환기설계 방법 제시 - 현장실측을 통한 기존 지침 및 복층터널 지침 적용 오염물질 배출량 계산 및 검토  <환기방식별 모범환기설계사례 제시>  <주행속도별 CO 소요환기량 기존(좌) 복층터널 지침(우)>

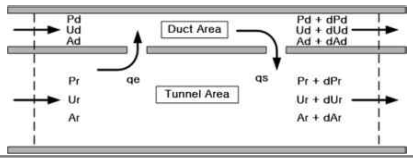
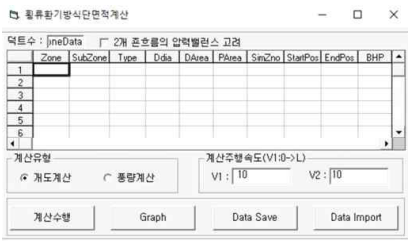
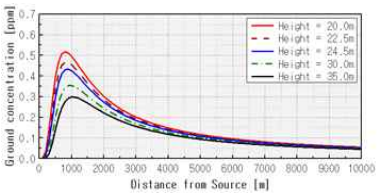
핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
복층터널 네트워크형 환기 설계 및 해석을 위한 소프트웨어 개발 (제이에스시 솔루션)	1차 년도	• 네트워크형 터널환기해석 알고리즘 기술 정립을 위한 자료 조사 및 알고리즘 분석	- 터널환기해석모델 국내외 자료 분석 • 유사분야 소프트웨어 조사 및 알고리즘 분석 • 1D-3D 연계 소프트웨어 알고리즘 분석 • 네트워크형 터널환기해석 알고리즘 기술 정립 오염물 발생량 조사 - 네트워크형 복층터널 환기 구성시스템 조사 - 국내외 터널용 환기팬 타입 및 종류 특성 조사 - 국내터널 형상 및 입구 조사 및 압력손실 분석
	2차 년도	• 네트워크형 복층터널환기해석을 위한 각 기능 알고리즘 개발	- 네트워크형 복층터널 유속 및 압력손실 계산 알고리즘 개발 : 네트워크형 터널환기해석 알고리즘은 근접행렬을 이용하여 네트워크 방향을 고려하도록 함. 또한 연산 알고리즘은 3D CFD에서 통용되는 Simple 알고리즘을 적용함 - 차량 및 교통량 변화에 따른 터널풍 계산 알고리즘 개발 - 환기팬 타입에 따른 환기풍 계산 알고리즘 개발 - 오염물 발생량 및 확산 농도 계산 알고리즘 개발 : 환기오염배출량 산정식 정립 및 오염확산식은 1차식으로 적용 - 복층 터널 유효 환기량 계산 알고리즘 - 터널 입출구 형상에 따른 압력손실 데이터 정립 - 온도분포 계산 알고리즘 - 터널 내·외의 압력차에 의한 자연풍 계산 알고리즘 개발 - 네트워크 터널환기 기능별 알고리즘 기반 해석 엔진모듈 개발 
	3차 년도	• 1D 3D 연계기술정립	- 영역 분할 방법 적용 검토 • Dirichlet-Dirichlet or Schwarz methods • Dirichlet -Neumann methods : Neumann -Neumann methods 
		• 1D 3D 연계 알고리즘 및 모듈 개발	- Coupling 기법 적용 검토 • Direct Coupling • Dirichlet-Neumann 적용 및 3D CFD(FDS, Nist) 연계 알고리즘 개발 - CFD 경계조건 입력을 위한 오염량 배출량 계산 모듈 개발

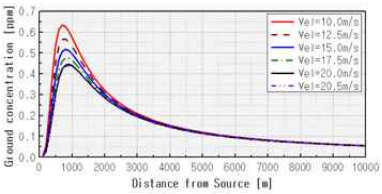
핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
	4차 년도	• 네트워크 터널환기해석 모델 전용 전/후처리 알고리즘 개발	- 국내외 소프트웨어 전후처리 방안도출 - 전/후처리 방식 및 알고리즘 개발  < 시뮬레이션 결과를 3D 그래픽 기반의 분석 및 출력용 모듈 개발 > - CSV 형태로 데이터 출력 및 변환 .TecPlot 형태로 변환 - 후처리기 사용자 매뉴얼 작성(부록에 매뉴얼 수록)
		• 실험을 통한 터널환기 분석 및 V&V 절차확정	- 개발 소프트웨어 통합 지침서 개발 - 개발 소프트웨어 V&V 절차 지침서 작성(초안), (V&V 절차서 초안 부록 수록) - 테스트베드 터널의 환기 및 오염물질 측정 실험 : 서울시 1㎞ 이상 도로터널 현장실험 진행
	5차 년도	• 터널환기 분석 및 V&V 절차 • 터널환기 시연 및 검증용 축소 모형 제작 • 복층터널 환기설비 설계지침(인하대학교)에 따른 설계 모듈 보완 및 해석 진행 • 소프트웨어 전/후처리 프로그램 2차 보완	- 프로그램 보완 : • 네트워크형 자유경계조건(OBC) 코딩 • 반복계산 프로그램 JACOBI -> SOR로 보완 - 터널환기 분석 및 V&V절차: • 절차서 초안 작성 • 고속도로 터널 환기설계기준(2012) 예제로 계산 결과 비교 검증(95% 이상)Vs - 소프트웨어 전/후처리 프로그램 2차 보완  < 분석 그래픽 처리속도 향상 보완 > - 전년도 개발내용 • 전후처리 보완내용 : 설계자의 편리성 증대 시킴
	6차 년도	• V&V 용 절차에 따른 네트워크 터널환기 모델 확인 및 검증 (V&V : Verification & Validation) 절차서 • 네트워크 복층 터널환기해석 소프트웨어 매뉴얼 보강 및 완료 • SW 공개 시연회 : SW구동 및 결과 제시	터널환기 분석 및 V&V절차서 • 프로그램 매뉴얼 보강 • 터널환기 설계 비교 • 한국고속도로공사 터널환기설계프로그램과 비교 검증 (95% 이상) - 네트워크형 복층터널 환기 해석 SW 공청회 및 시연회  < 테스트베드 환기분석 수행 >

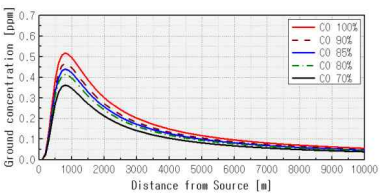
■ 복층터널 오염물질 확산 예측 및 외부 배출 방지 기술

핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
복층터널 오염물질 배출량 산정기술 및 환기기 운전제어 로직 개발 (신한대학교 산학협력단)	1차 년도	• 국내외 소형차종별 오염물질 배출량 산정기준 조사 및 분석 • 오염물질 배출량 보정을 위한 경사보정계수, 속도보정계수에 대한 조사 분석 • 터널 내 오염물질 허용농도 기준에 대한 조사 분석	- 일본, 유럽, 독일 등의 환기량 산정 기준조사 분석 - 소형차종, 화물차량의 경사도별 주행속도에 따른 CO, NO_x, 기준 배출량 조사 - 각 국(PIARC, 노르웨이, 오스트리아, 독일, 프랑스, 일본)의 오염물질 허용농도기준 비교 분석 - 차량 배출가스 측정 방법에 대한 분석 : CVS-75모드 및 PEMS를 이용한 실 도로 배출가스측정방법에 대한 분석 및 측정계획수립
	2차 년도	• 차종별(3개 차종) 주행속도별 오염물질 배출량 측정 • 차종별 오염물질 기준 배출량 도출	- 소형차종의 오염물질 배출량 측정(3개 차종 수행) • 3개 차종에 대해 차대동력계에 의한 정속주행시 배기가스 발생량 측정시험 (3개 차종:YF소나타,싼타페,뉴모닝)  < 배기가스 측정장치의 구성 > • 주행속도별, 경사도별 오염물질 배출량 측정 결과, 소나타에 대한 측정시험결과, 국립환경연구원에서 제시하는 배출계수에 의한 기준배출량 비교한 결과 비슷한 결과를 보이며, 현재 기준 보다 13.8~6.8배 감소하는 것으로 나타나고 있음. • NO_x기준배출량은 주행속도별로 약 46.8% 수준임
	3차 년도	• 소형차 전용 복층터널에 대한 환기량 산정방안 도출 • 조합환기방식의 운전단계 산정방안 제시 • 도로터널 환기기 제어로직을 평가 하기 위한 프로그램 개발	- 환기량 계산을 위한 기준배출량 산정방안 및 결과 제시 • 현행환기량 산정기준은 실제배출량보다 과대평가되어 있음 • 본실험만으로 기준배출량을 제시하는 데에는 한계가 있음. - 환기량 산정방안 제시 • 제작차 허용 배출량 및 환경부고시 차종별 오염물질 배출계수를 원배추량으로 하는 경우 소요 환기량 검토 • 현재공사중인 소형차 전용터널을 모델로 하여 환기량을 비교->매연은 약 5%감소, CO는 50%감소, NOx:43.8%감소 (10km/h기준) • 소요 제트팬 대수 비교 : 최대 제트팬 대수는 10km/h에서 결정되며, 52대에서 13대로 크게 감소함. - 조합환기방식에 대한 운전동력을 최소로 할 수 있는 운전단계선정 방안 • 운전조합에 따른 소요동력 및 발생 환기량 계산 • 최소 환기량 및 최대 환기량을 등분하여 각 환기량에 대해 운전동력을 최소로 할 수 있는 운전단계 선정방안 제시 - 터널 환기동적해석모델 작성 • 터널의 시간교통량은 변화를 반영한 터널환기시뮬레이션 • 시간변화에 따른 터널내 차량수 및 주행속도 계산 

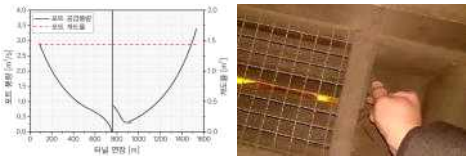
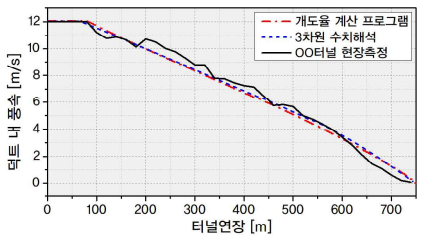
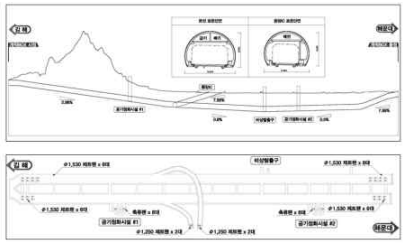
<table>
<tr><th>핵심
기술명</th><th colspan="2">연구개발 수행 내용</th><th>연구 결과</th></tr>
<tr><td></td><td>4차
년도</td><td>• 조합환기방식의 운전단계 산정방안검토 및 모델터널에 대한 운전단계 선정
• 환기기 운전제어 시뮬레이션 및 운전동력 비교</td><td>- 운전단계 최적화 방안에 대한 적용성 평가
• 모델터널을 대상으로 수직갱 방식, 공기정화방식, 횡류환기방식을 적용하는 경우, 운전단계 최적화에 따른 운전동력비 비교
• 모델터널 : 연장 5000m, 구배 : 1%, 단면적 36.2㎡
<table><tr><th>환기방식</th><th>구분</th><th>내용</th></tr><tr><td rowspan="2">수직갱방식</td><td>환기기 용량</td><td>제트팬 8대+수직갱(90㎥/s, 2EA)</td></tr><tr><td>소비동력</td><td>최대 환기기 운전동력 : 8EA×37kW+2EA×239kW=774kW</td></tr><tr><td rowspan="2">공기정화방식</td><td>환기기 용량</td><td>제트팬 8대+공기정화시설(100㎥/s), 공기정화시설의 제거효율 90%</td></tr><tr><td>소비동력</td><td>8EA×37kW+1EA×239kW+30kW(공기정화시설자체동력)=590kW</td></tr><tr><td rowspan="2">횡류환기방식</td><td>환기기 용량</td><td>제트팬 8대+급배기풍량(140㎥/s×2존)+축류팬(70㎥/s×4EA)</td></tr><tr><td>소비동력</td><td>8EA×37kW+4EA×186kW = 1040 kW</td></tr></table>- 환기방식별 환기기운전제어 시뮬레이션
 
(a) 기존방식 (b) 운전단계 반영
수직갱방식의 환기운전제어 시뮬레이션
- 환기방식별 환기기 운전동력 비교
<table><tr><th rowspan="2">환기
방식</th><th rowspan="2">운전단계</th><th rowspan="2">가동
시간
(분)</th><th colspan="2">환기기 누적가동시간</th><th colspan="3">환기팬 가동전력(kWh)</th><th rowspan="2">감소율
(%)</th></tr><tr><th>제트팬
(대×분)</th><th>축류팬
(㎥/s×분)</th><th>제트팬</th><th>축류팬</th><th>합계</th></tr><tr><td rowspan="2">수직갱
방식</td><td>기존방식</td><td>756</td><td>4626.0</td><td>12096.0</td><td>2852.7</td><td>222.1</td><td>3074.8</td><td>-</td></tr><tr><td>최적화</td><td>750</td><td>1686.0</td><td>66474.0</td><td>1039.7</td><td>1342.0</td><td>2381.7</td><td>22.5</td></tr><tr><td rowspan="2">공기정
화방식</td><td>기존방식</td><td>765</td><td>4650.0</td><td>13440.0</td><td>2867.5</td><td>205</td><td>3072.5</td><td>-</td></tr><tr><td>최적화</td><td>750</td><td>942.0</td><td>85860.0</td><td>580.9</td><td>1336.1</td><td>1917.0</td><td>37.6</td></tr><tr><td rowspan="3">횡류
환기
방식</td><td>기존방식</td><td>735</td><td>4740.0</td><td>37632.0</td><td>2923.0</td><td>1094.1</td><td>4017.1</td><td>-</td></tr><tr><td>최적화</td><td>753</td><td>2250.0</td><td>82992.0</td><td>1387.5</td><td>2487.9</td><td>3875.3</td><td>3.5</td></tr><tr><td>최적화(1)</td><td>783</td><td>852.0</td><td>104706.0</td><td>525.4</td><td>2741.3</td><td>3266.7</td><td>18.7</td></tr></table>주(1) 환기기 운전단계를 최적화하고 오염물질배출량 감소를 적용한 경우</td></tr>
<tr><td></td><td>5차
년도</td><td>• 서부간선 지하도로 터널 오염물질 배출량 제어에 따른 환기기 운전동력 산출
• 서부간선 지하도로 터널 설계적용
• 환기 시뮬레이터 개발</td><td>- 서부간선 지하도로에 대한 환기기 운전단계 제시(설계적용)
• 환기시뮬레이션을 통한 소비동력 평가방안 제시
- 개발된 알고리즘의 현장적용을 위한 PLC 제어프로그램
  </td></tr>
<tr><td></td><td>6차
년도</td><td>• 서부간선 지하도로 민간투자사업 건설공사용역 프로그램 현장적용
• 자동제어로직 현장적용-횡류환기방식</td><td>- 조합 환기 System에 대한 자동제어로직 현장적용
 
• 동적 시뮬레이션 프로그램을 통한 환기 시뮬레이션 수행을 통해 터널 내부 환경유지를 위한 자동제어로직 설계 반영
• 오염물질 외부 배출량 제어를 위한 자동제어로직 설계 반영
- (만덕-센텀)자동제어로직 및 운전 단계최적화 방안 제시(설계적용)</td></tr>
</table>

<table>
<tr><th colspan="2">핵심
기술명</th><th>연구개발 수행 내용</th><th>연구 결과</th></tr>
<tr><td rowspan="4">복층터널
오염물질
외부배출
영향 최소화
기술 개발
(범창종합기술)</td><td rowspan="2">2차
년도</td><td>• 대심도 복층터널의 오염물질 배출 관련 기준 및 저감시설 설치 사례 분석</td><td>- 국내 · 외 뉴질랜드, 홍콩, 영국, 노르웨이 등 오염물질 배출관련 기준 조사</td></tr>
<tr><td>• 터널 대배기구 설치사례, 기준 조사 및 분석</td><td>- 미국, 호주, 일본, 스페인, 홍콩, 프랑스, 오스트리아 등 국가별 오염물질 저감시설 사례 조사
 
< Eastlink Ventilation Stack in Melbourne ></td></tr>
<tr><td rowspan="2">3차
년도</td><td>• 대배기구 포트 최적화 프로그램 개발</td><td>- 횡류식 터널 대배기구 포트 개도율 계산을 위한 기본 산정식 작성
 
</td></tr>
<tr><td>• 프로그램 목록 및 소스 작성</td><td>- 대배기구 포트 개도율 계산 프로그램 소스코딩 및 솔버 구현
 
</td></tr>
<tr><td>4차
년도</td><td>• 오염물질 영향범위 저감</td><td>- 오염물질 영향범위 저감 조건 검토
 

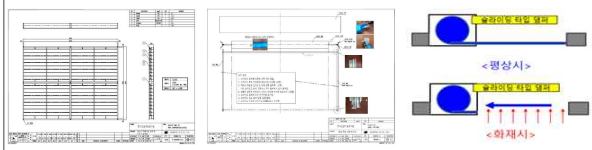
< 환기탑 높이에 따른 농도분포 >
 

< 환기탑 토출풍속에 따른 농도분포 >
 

< 환기탑 토출농도에 따른 농도분포 ></td></tr>
</table>

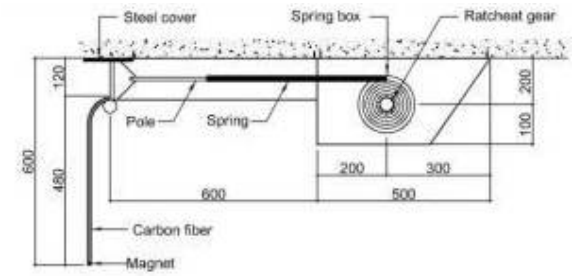
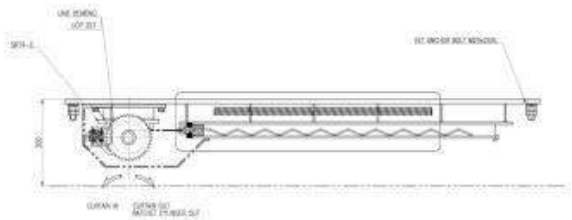
핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
	4차 년도	• 환기탑 모델 제시	- 오염물질 영향범위 15% 저감을 위한 환기탑 모델의 모형실험을 통한 성능 검증 진행  < 환기탑 축소 모형실험 > • 환기탑 모델에 대한 축소모형 실험 진행하여 결과 확산 범위 19~20.5%축소→영향범위 15%이상 저감 성능 확인
		• 대배기구 포트 최적화 프로그램을 통한 오차범위 최소화	- 현장측정결과 대비 대배기구 포트 프로그램 표준오차 10.1% →오차범위 15% 이하로 성능 만족  < 프로그램과 현장측정 결과 비교 >
	5차 년도	• 환기탑 설계 매뉴얼(안) 작성(1)	- “환기탑 설계 매뉴얼(안)” 설계지침 제시
		• 프로그램 최적화(1)	- 대배기구 포트 최적화 프로그램과 현장측정 결과, 3차원 수치해석 프로그램 결과 비교 분석하여 오차율 검토  [덕트 내 풍속 비교 분석]
	6차 년도	• 환기탑 설계 매뉴얼(안) 작성(2)	- “환기탑 설계 기준(안)” 설계지침으로 오염물질 영향범위 15% 저감하기 위한 환기탑 기본 모델 제시  [환기탑 설계메뉴얼 작성]
		• 프로그램 최적화(2)	- 프로그램 오차범위 10% 이하로 최적화 - 대배기구 포트 최적화 프로그램 현장 적용  [프로그램 현장 적용]

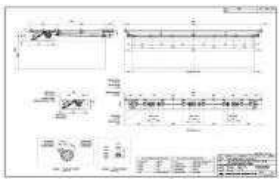
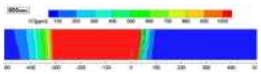
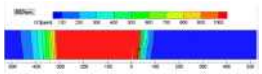
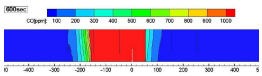
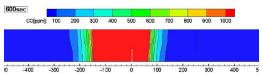
■ 복층터널 화재확산 제어 및 내화성능 향상 기술

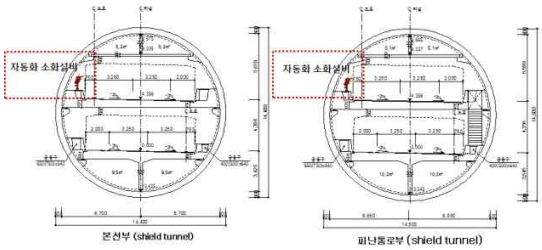
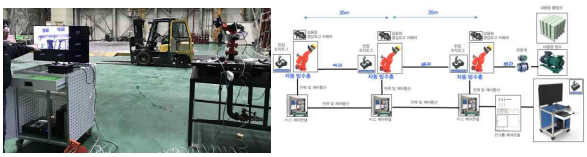
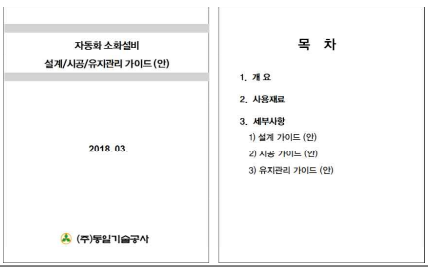
<table>
<tr><th>핵심
기술명</th><th></th><th>연구개발 수행 내용</th><th>연구 결과</th></tr>
<tr><td rowspan="4">복층터널
대배기구
시스템 및
중간슬래브
내화성능
향상 기술
개발
(한국건설기
술연구원)</td><td>1차
년도</td><td>• 국내·외 복층터널의 설계화재강도 조사
• 터널 내 화재 시 복층 소단면에 따른 화재 특성 및 연기발생량 특성 연구</td><td>- 국내외 복층터널의 설계 화재강도 조사
- 터널 내 화재 시 복층 소단면에 따른 화재 특성 및 연기 발생량 특성 연구
<table><tr><th>적용 차종</th><th>승용차</th><th>버스</th><th>트럭</th><th>탱크롤리</th></tr><tr><td>화재강도 [MW]</td><td>50이하</td><td>20</td><td>30</td><td>100</td></tr><tr><td>연기발생량 [m³/s]</td><td>20</td><td>60~80</td><td>80</td><td>200</td></tr></table>
<국내 설계화재강도 및 연기발생량></td></tr>
<tr><td>2차
년도</td><td>• 설계화재강도 제시를 위한 실규모 자동차 연소 실험
• 복층터널 설계화재 곡선 제시
• 배연효율 최적화를 위한 대배기구 시스템 설계
• 터널 중간슬래브 내화성능평가 DB구축
• 복층, 시스템터널에 적합한 내화피복재(건식, 습식공법) 선정
• ISO, RABT, RWS 등 터널 표준화재조건 내화성능평가 및 내화피복기술 개발</td><td>- 실규모 차량 연소 실험을 통한 복층터널내 화재 특성 분석
 
<복층터널 차량화재 실험 및 결과>
- 화재 연동형 대배기구 시스템 설계
 
<타입별 화재연동형 대배기구 설계도 및 구동 개념>
- 일본 복층터널 내화설계기준 및 적용 내화기술 조사 분석
- 중간슬래브용 습식 및 건식 내화피복기술 RABT, RWS 내화성능시험 수행</td></tr>
<tr><td>3차
년도</td><td>• 복층터널 화재대응 시스템 제작 및 작동 실험 수행
• 터널 중간슬래브에 적용되는 고강도 콘크리트(60MPa) 내화성능평가 DB구축
• 고강도 콘크리트가 적용된 복층터널 중간슬래브의 온도이력과 화재시 거동특성 파악
• 표준화재조건 및 터널 화재강도(RABT, RWS)에 대응하는 내화피복기술 성능평가 및 적용 구조 제시
• 복층터널 중간슬래브 등 내화성능기준 제시</td><td>- 화재 연동형 대배기구 시제품 제작
- 대배기구 시스템 적용을 위한 FDS 화재 시뮬레이션 (국부 배연특성 파악)
- 화재진압용 원격 자동소화설비 시작품 분사 및 작동 시험 (1차)
- ISO, RABT, RWS의 화재강도에 대응하는 고강도(60MPa) 복층터널 중간슬래브 폭렬 방지성능 및 내화피복기술 성능을 평가하고 내화성능 DB 구축
- 복층터널 중간슬래브 등 내화설계메뉴얼 작성을 위한 내화성능기준 제시
<table><tr><th rowspan="2">구분</th><th>주구조물</th><th>부구조물</th></tr><tr><th>중간슬래브, 라이닝</th><th>풍도슬래브, 피난통로</th></tr><tr><td>복층터널(승용차)</td><td>ISO 60 분</td><td>ISO 60 분</td></tr><tr><td>중량 자동차</td><td>RWS 120 분</td><td>RWS 120 분</td></tr></table></td></tr>
<tr><td>4차
년도</td><td>• 복층터널 화재대응 시스템 성능시험 및 고도화
- 자동 소화시스템 시작품 성능시험
- 영상유고 화재 감지형 자동소화시스템 개발
- 화재 연동형 대배기구 시스템 성능 시험
• 화재시험용 복층터널 TEST BED 구축
• 복층터널 중간슬래브 등 구조물의 내화성능기준과 내화설계지침</td><td>- 자동소화시스템 시작품을 이용한 터널 차량화재 진압실험 수행
 
<복층터널 차량화재 실험 및 결과>
- 영상유고 화재 감지형 자동소화시스템 시제품 개발 및 성능 시험
 

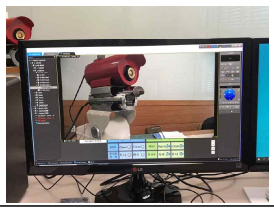
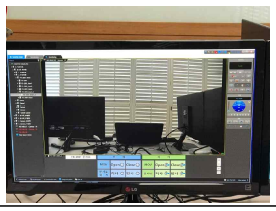
<장거리형 시제품 제작 및 화재진압실험></td></tr>
</table>

핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
		제시 • 터널 화재에 노출된 복층터널 중간슬래브의 특성 및 손상도 평가 기준제시	- 노즐입구 분사압력 및 분사각에 따른 원격 자동소화설비 분사 궤적 수치 모사 - 화재연동형 대배기구 시작품 성능시험 수행 (유사구조물 단위 화재연동 작동 실험) - 화재실험용 복층터널(단층) 구현 Test Bed 구축 (3세부 개발 기술 성능 시험 수행) - 복층터널 중간슬래브 등 콘크리트 구조물의 내화성능기준 및 내화설계지침 제시 - 복층터널 중간슬래브 화해 피해 손상도 평가기준 제시
	5차 년도	• 옥내 소화전을 이용한 원격 자동소화 시스템 개발 • 복층터널 화재대응 시스템 현장적용을 통한 실용화 추진 • 화재 연동형 대배기구 작동 시험 및 운영 매뉴얼 · 복층터널 중간슬래브의 고온 노출에 따른 손상도 평가 · 복층터널 중간슬래브 손상도에 따른 보수/보강 지침 제시	- 옥내 소화전용 원격 자동소화 설비 개발 및 성능 시험  < 1차 시제품 > < 2차 시제품 > < 화재진압실험 > - 옥내 소화전용 원격 자동 소화 시스템 현장적용 시제품 및 제어설비 제작  < 원격 자동소화 시스템 현장적용 시제품 > - 화재연동형 대배기구 시스템 성능시험 (화재실험 Test bed 단위 화재연동 작동 실험) - 도로터널 대배기구 설치 및 운영 매뉴얼 작성 - 복층터널 중간슬래브 구조물의 고온 노출시 손상도 평가 수행 - 복층터널 중간슬래브 손상도에 따른 보수보강 지침 작성  < 복층터널 중간슬래브 화재손상 평가>
	6차 년도	• 복층터널 화재 대응 시스템 실용화 연구	- 원격 자동소화 시스템 현행터널 시범설치를 통한 현장적용 (서울특별시 강남구 소재 구룡터널 內)  < 원격 자동소화 시스템 구룡터널 현장적용 > - Mock-up Test Bed 내 복층터널 화재 대응 시스템 구축 (연구 성과물 적용)  < Mock-up test bed 구축 >

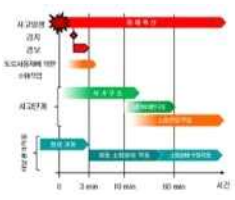
핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
복층터널에 설치 가능한 화재연기 확산지연 기술 개발 (유원컨설턴트)	2차 년도	• 국내·외 제연설비 및 연기확산 지연시스템에 관한 기준 및 적용 사례 조사 • 연기확산 지연 시스템 관련 기술 조사 및 관련 분야 연관 기술 분	- 화재연기 확산지연시스템 관련 기술 조사 • 에어백 방식 : 산소공급 차단에 의해 적극적 화재진압 가능, 연기와 열확산 차단 능력이 우수하지만 터널 이용자 탈출불가로 인한 질식사 발생 • 커튼 방식 : 화재연기와 열 차단가능, 설치가 간단하고 단시간 내 작동이 가능하지만 전원 단절 또는 물을 이용하는 경우 겨울철 동파에 의해 작동이 불가 - 화재연기 확산지연장치 개발사례 : 한국도로공사 에어커튼 • 최초에 제연용 제트팬을 대신하여 사용하기 위해 개발 되었으며, 연기확산 지연을 목적으로 매현2터널에 시범설치 됨, 경제성이 낮음 - 오스트리아 Roppen 터널 적용사례 : 횡류식 환기방식 터널에 적용 하였으며, 터널 천장에 STS로 밀폐된 케이스에 설치하여 슬라이더 형식으로 작동됨 에어커튼 형식 슬라이더 형식  
	3차 년도	• 화재연기 확산지연장치 작동 원리 개념 정립 및 구동방안 개발 • 연기확산 지연장치 주요 부위 부품도 제작(도면 작성)	- 화재연기 확산지연장치 구동방안 검토  • 스프링 탄성을 이용한 것으로써 평상시는 스프링을 감아놓아 탄성에너지가 축적되도록 고정시켜놓고, 화재발생시에 잠금장치를 해제하여 스프링 탄성에너지가 운동에너지로 변환되어 터널 상부에서 하부로 내려와 화재연기 확산을 지연시키는 구동방안 검토 - 화재연기 확산지연장치 제작도면 작성 제어부 및 커튼부 제작도면 
	4차 년도	• 화재연기 확산지연장치 제작도면 작성 • 화재연기 확산지연장치 시제품 제작 • 화재연기 확산지연장치 현장실험	- 화재연기 확산지연장치 제작도면 및 시제품 제작

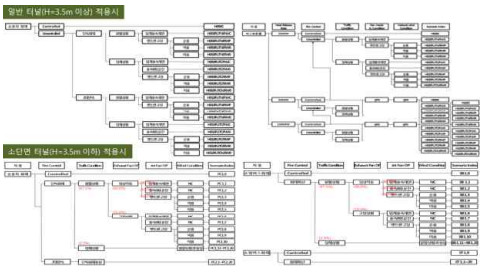
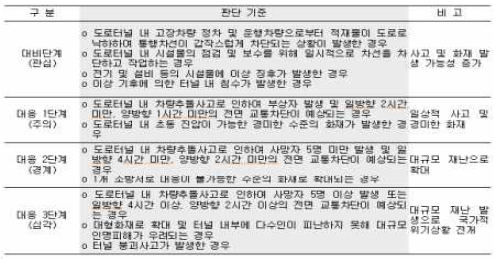
핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
			제작도면 시제품   - 화재연기 확산지연장치 현장실험 결과   • 화재연기 확산지연장치 미작동시와 화재연기 작동 시 커튼 부 전, 후방에서의 온도 차이는 미작동시 최고 약 85.9℃ ~75.9℃, 작동 시에는 최고 약102℃~7.1℃까지 차이가 나는 것으로 분석됨
	5차 년도	• CFD 분석을 통한 화재연기 확산지연장치 커튼길이 및 설치간격 분석	- 화재연기 확산지연장치를 100m 간격으로 500m 까지 설치면적(18,50,80%)에 대하여 시뮬레이션 분석하였음. - 수치해석 모델(터널길이 2.5km / 터널높이 3.0m / 단면적 37.32m^2 / 터널경사 0.5% / 화재위치 1.25km) 100m 간격설치 / 차폐율 18% 500m 간격설치 / 차폐율 18%   100m 간격설치 / 차폐율 80% 500m 간격설치 / 차폐율 80%   - 화재연기 확산지연장치의 설치간격과 무관하게 차단비가 클수록 지연효과가 높게 분석되었으며, 차폐율인 낮은 경우 설치간격이 짧을수록 지연효과가 높아졌고, 차폐율이 80%인 경우 설치간격과 무관하게 연기전파거리가 비슷한 경향을 보이는 것으로 분석되었음.
	6차 년도	• TEST BED 적용 • 화재연기 확산지연장치 설치(시공) 및 유지관리 가이드라인 작성	- 건설기술연구원 연천 SOC 실증센터 TEST BED 구축 정면 후면   - 화재연기 확산지연장치 설치 및 유지관리 가이드라인 작성 • 장치 운반요령 및 주의사항 제시 • 장치 상세 설치요령 및 주의사항 제시 • 화재연기 확산지연장치의 운영 및 유지관리

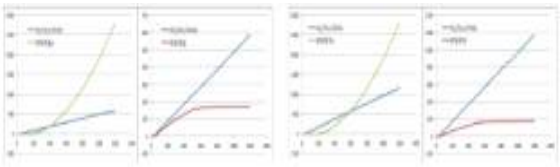
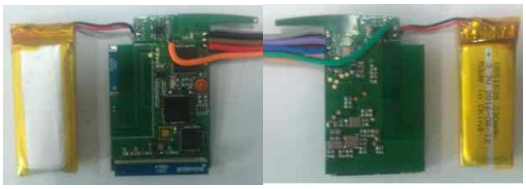
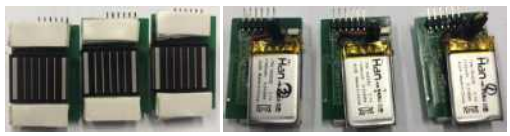
<table>
<tr><th>핵심
기술명</th><th colspan="2">연구개발 수행 내용</th><th>연구 결과</th></tr>
<tr><td rowspan="4">소형차전용
복층터널
화재진압용
자동화
소화설비
개발
(동일기술공사</td><td>2차
년도</td><td>• 국내·외 원격 자동소화설비 기술조사
• 원격 자동소화설비 도로터널 적용방안
• 초기 시작품 제작 및 실내 실험</td><td>- 국내외 원격 자동소화설비 조사 및 초기 시제품 제작 방안 도출
- 국내·외 기술자료분석을 통한 적용방안 도출 : 최대분사거리, 크기, 구동방식, 설치간격, 자동화연동방식 등
- 원격 자동소화설비 초기 시작품 제작 및 초기실험 : 15m 이상 분사를 위한 사전 실내 실험 실시 및 정량적인 지표 달성</td></tr>
<tr><td>3차
년도</td><td>• 원격 자동소화설비 자동화 방안 및 1차 실내실험 DB수집
• 원격 자동소화설비 2차 실내실험 및 매뉴얼 개발
• 원격 자동소화설비 Test Bed 및 상용화 연구</td><td>- 원격 자동소화설비 토출압력(3.0bar)에서 최대거리 및 시설 한계고를 고려한 결과 각도 15도에서 최적실험을 도출
 
<table>
<tr><th rowspan="2">각도</th><th rowspan="2">모니터
높이(cm)</th><th rowspan="2">최고점
높이(m)</th><th colspan="2">수직높이(m)</th><th rowspan="2">최대거리
(m)</th></tr>
<tr><th>수평(15m)</th><th>수평(22.5)</th></tr>
<tr><td>15</td><td>130</td><td>11-12</td><td>2.8</td><td>0.7</td><td>25</td></tr>
<tr><td>20</td><td>135</td><td>12-13</td><td>3.8</td><td>2.5</td><td>26</td></tr>
<tr><td>25</td><td>138</td><td>14</td><td>4.8</td><td>3.4</td><td>28</td></tr>
<tr><td>30</td><td>141</td><td>18</td><td>6.0</td><td>5.0</td><td>29</td></tr>
<tr><td>35</td><td>145</td><td>17</td><td>7.0</td><td>5.0</td><td>27</td></tr>
</table>
- 40m 이상 장거리 분사를 위해 원격 자동소화설비의 분사헤드 개선 및 토출압력 증가(5.0bar)조건에서 2차 실험을 수행한 결과 40m 이상 분사거리 확보
- 원격 자동소화설비 설계/시공/유지관리를 위한 매뉴얼작성을 위한 복층터널 설계적용방안 제시
 
</td></tr>
<tr><td>4차
년도</td><td>• 원격 자동소화설비 실내실험계획 및 실험 (3차)
• 원격 자동소화설비 상용화 시제품 제작
• 원격 자동소화설비 성능검증 실험체 제작
• 원격 자동소화설비 설계/시공/유지관리 매뉴얼 작성</td><td>- 원격 자동소화설비 도로터널 적용을 위한 제원으로 상용화 시제품 제작 및 성능검증을 수행함
 
- 원격 자동소화설비 설계/시공/유지관리를 위한 관련내용 수집 및 초안 작성
 
</td></tr>
<tr><td>5차
년도</td><td>• 현장 적용을 위한 상용화 시제품 제작 및 자체 성능검증 수행</td><td>- 국내 옥내소화전 소화설비 적용을 위해 서울시 관내 구룡터널 현장적용 추진완료
- 상용화 시스템 구현을 위한 제품 제작 개선 및 상용화 설치 적용 시제품 개선 수행 (경제성 확보 목적)</td></tr>
</table>

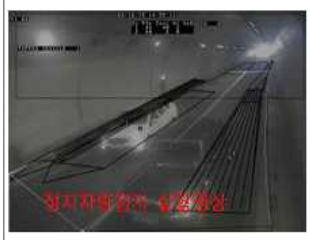
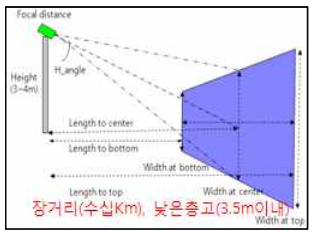
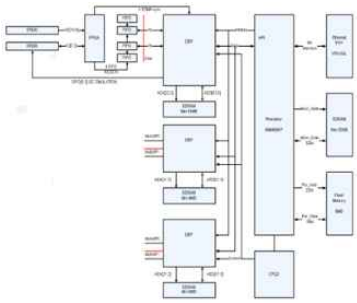
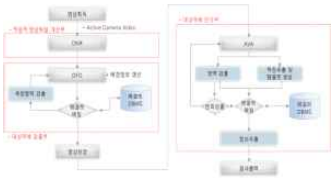
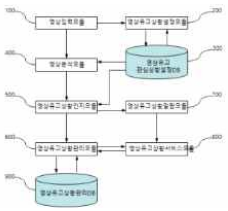
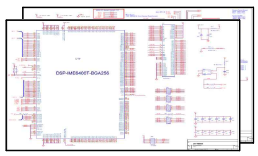
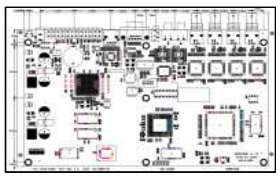
핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
			 
	6차 년도	• 복층터널용 자동화 소화설비 경제성 검토 • 실규모 복층터널 설치 및 상용화 적용방안 설계방안 연구	- 기존 물분무 설계 대비 LCC측면의 경제성 검토 결과 약 30%이상의 경제적인 절감이 가능하다는 것을 도출 (기존 00 도로터널 5Km 설치공사 기준 적용) - 최종 상용화 시제품 및 원격 제어가 가능한 운영시스템 구현이 가능한 제품 개발을 완료함.  

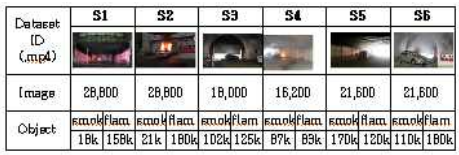
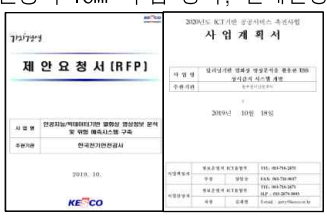
■ 복층터널 화재안전 평가 및 관리시스템 구축

핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
복층터널 화재시나리오 정립 및 안전성확보를 위한 운영방안 수립 (주성지앤비)	1차 년도	• 대심도 복층 터널에 적용하기 위한 위험도 평가방법 검토 • 국내·외 기존 터널과 복층터널 사고사례 문헌조사 • 국내·외 터널 정량적 위험도 평가방법 검토	- 터널 화재 정량적 위험도 분석 사례 조사를 통한 동향 분석 - 국내·외 터널 화재 사고 사례(터널 화재 사건 발생 및 피해결과 분석)를 통한 주요원인 및 소형차 전용 터널 위험요인 분석 - 터널화재 위험평가 방법 조사 - 화재시나리오 개발을 위한 국내외 기준 및 방법론 조사
	2차 년도	• 대심도 터널 사고 사례를 통한 복층터널 위험요인 도출 및 화재시나리오 초안 작성 • 국내·외 기존 터널과 복층터널 사고결과 비교 • 국내·외 터널 내 화재시나리오 비교 분석 및 문제점(고려사항) 도출 • 화재시나리오 초안 작성	- 국내·외 터널 내 사고 사례 집계 및 사고 유형과 주요 원인 조사 - 소화설비 적용을 위한 국내·외 도로터널 정량적 평가방법 및 모델 수립에 대한 문헌조사 - 복층터널 구축 시 예상 위험요인 도출 - 복층터널 적용 가능 정량적 위험도 평가 모델 설정 연구 방향 도출  
	3차 년도	• 복층터널 적용 화재시나리오 작성	- 복층터널에 적용가능한 화재 시나리오 • 일반터널(H=3.5m 이상)과 소단면 터널(H=3.5m 이하)에 적용 가능한 화재시나리오 작성

핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
	4차 년도	• 복층터널 적용 화재시나리오 작성 • 복층터널 정량적 안전성 평가방법 개발 • 터널 방재시스템 User중심의 운영 가이드라인 개발	- 복층터널에 적용가능한 화재 시나리오 • 승용차 화재시나리오와 버스 및 화물차 화재시나리오로 구분하여 4개의 화재시나리오 작성  < 일반터널, 소단면 터널의 화재시나리오 > - 국내·외 터널 소화설비 현황 분석 • 국내·외 터널 소화설비 현황 분석 수행 • 물분무설비, 원격포소화설비 등 최근 개발된 소화설비 파악
	5차 년도	• user 중심의 운영 가이드라인 전문가 검증 • 터널 방재시스템 User중심의 운영 가이드라인 개발	• 공개 공청회를 통한 운영 가이드라인 수정(안) 작성 
	6차 년도	• user 중심의 운영 가이드라인 전문가 검증 • 터널 방재시스템 User중심의 운영 가이드라인 개발	- 공개 공청회를 통한 운영 가이드라인 전문가 검증 • 전차년도 개발된 가이드라인에 대한 전문가 검증 및 보완사항 적용 → 터널사고 발생시 사고 현장과 터널 관리동을 구분지어 현장관리 및 인근 관계기관으로의 상황전파 추가 → 사고 규모에 따른 관계기관의 상황전파 내용 추가 → 사고상황에 따른 각종 방재시설 및 환기시설의 가동 순서 추가 • 방재시설에 대한 유지관리 방안 검토 → 일상점검, 정기점검, 정밀점검, 긴급점검 등 점검종류 정의 → 방재시설별(송·배풍기 설비, 제트팬·부스터팬 설비, 계측관련기기, 소화설비, 경보시설, 피난설비, 소화활동설비 등의 점검요령)
복층터널 신속대피를 위한 스마트 피난경보 앱 개발 (주성지앤비)	2차 년도	• 무선네트워크 기술의 사전조사 • 무선측위전용 네트워크 기술 비교 • 휴대폰 통신기술 및 기타 WPAN 기술 비교	- 멀티래터레이션, 도착신호의 각도, RIG, 지역 전파패턴 연구 비교 - Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, UWB, RFID의 사례조사 분석 및 무선통신 기술의 기술 비교
	3차 년도	• 복층터널 특성을 고려한 피난안전성 검토 • 최적피난을 위한 최적피난선택로직 연구	- 복층터널의 피난특성연구 - 수치해석을 통한 복층 터널 내 본선 피난안전성 연구 - 쉘터 내 가압조건, 피난연락갱 간격, 대피계단 폭원 등 수치해석을 통한 복층 터널 내 분기부 피난안전성 연구

핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
			 < 최적피난을 위한 최적피난연결통로 선택 로직 연구 >
	4차 년도	• 무선 Network Hardware 시스템 개발 • Test bed를 통한 사업화 연구	- 블루투스 AP 시제품 제작 [1차 시작품 - 비자가발전형 AP] • CPU, BLE, 센서, RF 등으로 구성된 비자가발전형 블루투스 AP 제작  [1차 시작품(비자가발전형)]
	5차 년도	• 무선 Network Hardware 시스템 개발 • Test bed를 통한 사업화 연구	[2차 시작품 - 자가발전형 AP] • AP의 설치 및 유지관리능력 향상을 위하여 상시전원이 아닌, 자가발전능력을 보유 • 에너지 하베스팅 전원 적용  < 2차 시작품(자가발전형) > • 개발된 블루투스 AP와 연동하여 피난자들에게 직접적으로 피난경로를 안내할 피난 앱(App) 개발 • 터널내 비치될 터널 이용될 “스마트 피난 안내 장치” 내 피난방향 지시등 베타버전 제작 및 연동  [피난방향 지시등 베타버전]
	6차 년도	• 무선 Network Hardware 시스템 개발 • Test bed를 통한 사업화 연구	- 블루투스 AP 시제품 제작 • 무선 AP 최적화 및 소형화 수행 → 무선 AP 크기 : 5cm*5cm  [무선 AP 최적화 및 소형화] - 피난 앱 자체실험을 통한 성능향상

핵심 기술명		연구개발 수행 내용	연구 결과
			• 회로도 수정 및 최적화를 통해 피난방향 안내 소요시간 최소화 - 연천 Mock-Up Test Bed 설치를 위한 무선 AP 및 피난안내시스템 설치방안 도출
복층터널 특성 반영이 가능한 영상유고감지시스템 (보임정보기술)	2차 년도	• 국내·외 주요 영상유고감지시스템 분석(기술방식 비교) 및 터널 적용사례 조사 연구 • 복층터널 영상유고감지시스템 하드웨어·소프트웨어 아키텍처 시작설계	- 국도, 고속국도터널 10개소, 국내외 4개 벤더제품 분석 - 광치터널 국외 영상유고감지설비 설치, 성능 실험연구 진행 - 복층터널 설계특성 고려, 영상유고감지 H/W 및 S/W 아키텍처 시작 설계도  
	3차 년도	• 복층터널 영상유고감지시스템 하드웨어·소프트웨어 아키텍처 설계	- 복층터널 영상유고감지시스템 하드웨어 설계도 제시  <시제품/단독형 설계도> - 복층터널 영상유고감지시스템 소프트웨어 설계(알고리즘 및 어플리케이션) 제시  <알고리즘 블럭도>  <특허출원 대표도>
	4차 년도	•시제품 제작 •엔지니어링 시제품, VIT100 보드 제작 및 가동시험	- H/W 기기 분해도, Schemetic 및 PCB, 기구 설계 제시  < PCB Ass'y >  < Schemetic >  < PCB Artwork >  < 기구설계 >

<table>
<tr><th colspan="2">핵심
기술명</th><th>연구개발 수행 내용</th><th>연구 결과</th></tr>
<tr><td></td><td>5차
년도</td><td>•시제품 제작
• 소프트웨어 통합 개발 및 통합 시스템시험</td><td>- 엔지니어링 하드웨어 시제품 고도화 개발
- 집합형 시제품 개발 및 디버깅, 가동시스템 설치시험운영
 
<시제품>
- 화재(연기,화염) 영상 빅데이터기반 알고리즘의 고도화
- 소프트웨어, 시제품 고도화 개발 및 시험
 
<차량 실물화재실험 영상 데이터></td></tr>
<tr><td></td><td>6차
년도</td><td>• 복층터널 영상유고감지시스템 성능시험 및 현장적용</td><td>- 현장적용 성능 실험연구(2개소)
• 복층터널 테스트베드, 차량실물 화재 실험 연구
• 광치터널 영상유고감지설비 성능 실험연구
 
<table><tr><td>Dataset ID (.mp4)</td><td>S1</td><td>S2</td><td>S3</td><td>S4</td><td>S5</td><td>S6</td></tr><tr><td>Image</td><td>28,800</td><td>28,800</td><td>18,000</td><td>16,200</td><td>21,600</td><td>21,600</td></tr><tr><td>Object</td><td>smok/flam
18k</td><td>smok/flam
158k</td><td>smok/flam
21k</td><td>smok/flam
180k</td><td>smok/flam
102k</td><td>smok/flam
125k</td><td>smok/flam
87k</td><td>smok/flam
83k</td><td>smok/flam
170k</td><td>smok/flam
120k</td><td>smok/flam
110k</td><td>smok/flam
180k</td></tr></table>
<실험 데이터셋, 이미지 DB파일>
- 연구개발성과 활용/기술이전, 현장적용
• 한국전기안전공사 ISMP 수립 용역, 설계반영
 

<한국전기안전공사 설계용역></td></tr>
</table>

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 연구개발 목표

■ 1세부 : 복층터널 최적화 설계기술 개발

◦ 국내 기술력 확보 및 국가 정책에 부합되는 대심도 복층터널 건설을 위한 설계기술의 확보를 목표로 하며, 이를 위하여 병설터널보다 경제적인 복층터널 설계법을 개발하고, 주변 지역의 지반침하 등의 영향을 최소화하면서, 분기부등에 적용가능 한 설계법을 개발함.

◦ 운전자 친화적인 복층터널 설계를 위하여 특수한 단면에 대한 교통표지 및 조명 방안에 대하여 도출하고, 장대터널에 적용이 가능한 환경친화적인 불연도료를 개발함.

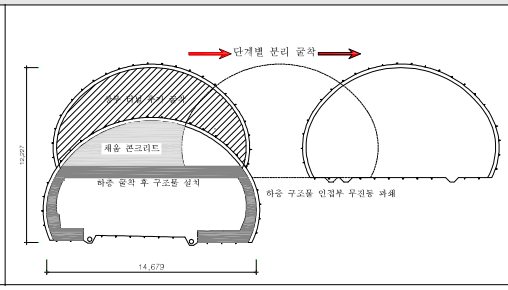
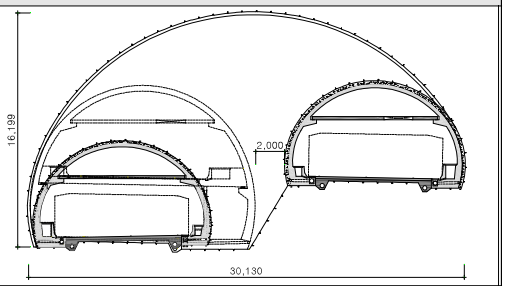


▸ 제1요소기술 : 복층터널 최적화 단면 설계기술

◦ 복층터널 내부구조, 내부 네트워크의 국내 설계사례가 없어 설계 시 경제성과 안정성을 고려한 복층터널 분기구간 계획과 복층터널의 내·외적 안정성을 확보하고 다목적 활용 방안에 대한 최적화 단면 설계 방안 마련

- 터널 단면설계시 선형조건, 차종, 건축한계, 비상사고 시 유지관리용 접근성 등을 고려하여 다양한 터널단면 형상 도출 모색
- 관련 기술력과 경험을 보유하고 있는 관계기관과의 협력 체계 구축 및 기술도입·기술자문을 적극적으로 추진하여 분기구간의 기하구조 및 최적의 복층단면 설계안 도출방안 모색

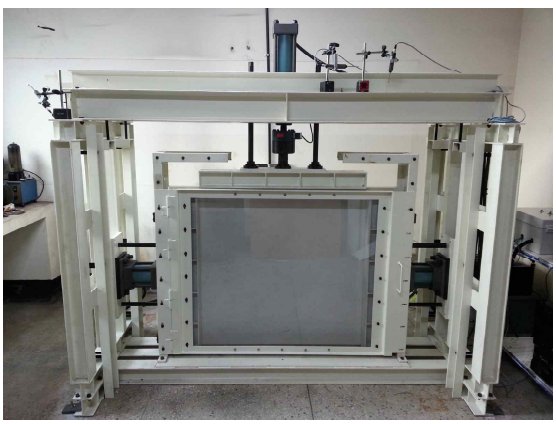
◦ 지하 IC/JCT 연결로 유출입 접속부 및 노즈부 설계기술 개발과 상하층 분리구조 설계 및 초대형 단면 분리 설계기술 개발

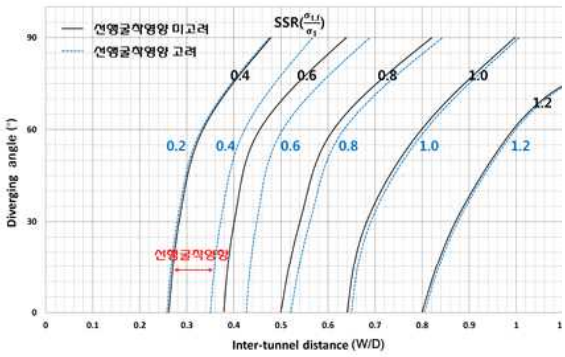
구 분	하층굴착 후 상층터널 분리	대단면 분리 굴착
시공 개요		
굴착면적	156.5㎡	342.1㎡
특징	- 대단면 굴착 미발생 - 시공 순서 복잡으로 시공성 저하 우려	- 터널폭 30m 이상의 광폭 대단면터널 발생 - 좌우 비대칭으로 장기적 안전성 불확실
시공 순서	- 하층 굴착→슬래브 구조물 설치→슬래브 상부 공간 채움 콘크리트→상부 추가굴착→단계별 분리 굴착	- 복층터널 굴착→상층 차선이동에 따른 확폭굴착→ 분리부 대단면 굴착→병설터널 분리

◦ 모형실험과 수치해석의 Parametric Study를 통하여 복층터널 지하 IC/JCT 연결로 접속부의 암반등급에 따른 적정 이격거리 및 이격각도에 대한 평가를 수행하였음.

◦ 축소모형실험과 수치해석을 통하여 복층터널 분기구간의 안정성 평가 기법을 개발 하였음.

◦ 복층터널 최적화 단면 설계 가이드라인 및 분기부, 접속부의 굴착/보강 설계방안을 Test bed 구현에 적용하여 개발기술의 완성도 향상에 기여하였음.





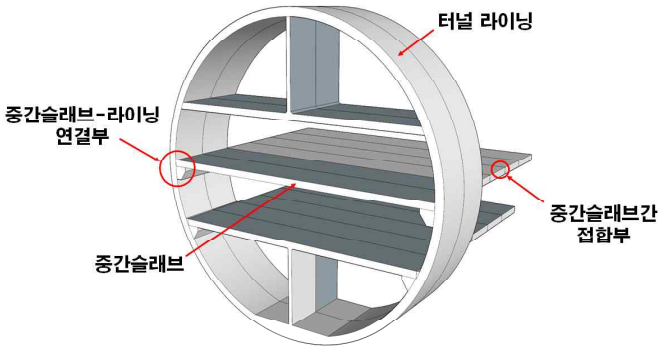
<터널축소모형 실험장비 및 안정성 평가차트>

▶ 제2요소기술 : 복층터널 구조체 설계 및 성능평가 기술

◦ 대심도 복층터널의 차량통행을 위한 중간슬래브 단면 설계기술 및 프리캐스트 중간슬래브 조립지침을 개발

- 복층터널 중간슬래브의 최적 단면을 설계할 수 있는 기술을 개발하고 슬래브간의 접합부를 연결하는 방안을 개발.

- 복층터널 중간슬래브와 콘크리트 라이닝간의 상호 연계를 위한 구조체 설계기술을 개발.
- 복층터널 라이닝 강결부의 내하력을 평가하여 안전성을 확보하고 프리캐스트 중간슬래브의 조립을 위한 지침을 개발.



<대심도 복층터널 중간슬래브 개념도>

◦ 슬래브 동하중 전파에 따른 구조물 응답특성 분석
- 복층터널 중간슬래브를 통한 동적하중 전파에 따른 전체 터널구조물 응답해석기술을 개발

◦ 중간슬래브 구조와 라이닝간의 상호 연계 내진설계
- 복층터널 중간슬래브 구조와 터널 콘크리트 라이닝간의 상호 연계 내진해석기술을 개발
- 복층터널 중간슬래브 구조와 터널 콘크리트 라이닝간의 상호 연계 내진설계기준 정립
- 중간슬래브-라이닝-지반의 상호작용을 고려한 내진설계기술 개발
- 실대형 진동대시험 및 원심모형시험 수행 및 이를 이용한 동적해석 및 설계기술 개발

▶ **제3요소기술 : 복층터널 근접시공 안정성 확보를 위한 설계기술**

◦ 도심권역 특성에 맞는 맞춤형 복층터널 지보/보강 설계기술은 기존 설계기술 대비 5% 이상 지보효과 및 활용성 향상을 최종목표로 대심도 복층터널의 지층조건, 시공현황 등을 반영한 지보 및 보강 설계기술을 개발하고자 함. 도심지에서의 대단면 터널의 설계 및 시공사례 조사, 도심지 지반손실 최소화를 위한 영향인자를 파악하고 상관도 분석을 실시하며, 수치해석에 의한 굴착단계별 거동 분석 등을 통해 도심지 대단면 터널에 적합한 지보 및 보강기술을 마련하고자 함.

◦ 대단면 복층터널의 근접시공 안전도 평가기술은 터널 시공단계별 지반변형, 지하수 변동 메카니즘 분석, 인접구조물과의 영향 및 상호작용 평가, 근접시공

안전도 평가기술로 분류하며 차년도별 연계하여 연구를 진행할 계획임.

◦ 터널 시공단계별, 지반변형, 지하수 변동 메카니즘 분석연구는 기존 기술대비 20% 이상 예측 정확도 향상과 선진국 대비 90% 이상의 기술향상의 최종 목표를 위해 실내모형 시험과 수치해석을 이용하여 지하수 변동에 따라 지표와 지반침하 형태, 굴착에 따른 침하영역을 평가하는 것이 목표임. 또한 토립자 유실을 모사하여 지표함몰 거동도 추가 분석하고자 함. 실내 모형시험의 결과가 수치해석을 통해 검증되면, 실제 설계에 적용할 계획임.

◦ 인접구조물과의 영향 및 상호작용 평가연구는 도심지 기존 도로 하부에 복층터널이 건설된다는 가정하여 대표적인 지반조건과 지하수 조건을 바탕으로 연구를 진행할 계획임. 대단면 굴착에 따른 인접구조물 하부 기초의 영향을 판단하고, 설계단계 시 쉽게 이용할 수 있는 설계 차트 및 안정성 평가 방법을 제시를 목표로 함. 또한 위 결과를 바탕으로 지반-기초-구조물 상호작용을 통하여 축소모형 및 수치해석을 기반으로 손상영역을 판단하고자 함.

◦ 근접시공 안전도 평가연구는 위 모든 결과를 바탕으로 선진국 대비 90% 이상 기술향상을 최종 목표로 근접시공에 따른 인접구조물 안전도 평가 프로세스 1건과 평가 시스템 및 지침(안) 1건을 작성할 계획임.

▸ **제4요소기술 : 복층터널 내부시설 운전자 친화 설계 기술개발 및 가상 프로젝트**

◦ 복층터널 단면 최적 표지 및 조명시스템 개발에서는 장경간화 및 낮은 터널높이로 인해 운전자에게 사전사고예방을 도모하기 위한 입체 표지판 및 고효율 친환경 태양광을 이용한 조명시스템 개발하여 화재나 교통사고시 신속한 대피가 이루어져야 하기 때문에 이러한 입체 표지판 및 조명시스템을 통하여 사전에 평시 운행시 차량 탑승자가 대피위치를 파악할 수 있는 설계 기술 방안을 제시하는 것을 목표로 함

◦ 복층터널 내부 타일 대체용 친환경 불연도료의 개발에서는 타일 대체가 가능한 중금속을 함유하지 않은 환경 친화적인 불연도료를 개발하여 시공 및 유지관리가 타일보다 경제적이고, 화재 시 유독가스로부터의 안전함과 동시에 터널에 적합한 품질을 만족시키는 것을 최종목표로 설정함.

◦ 복층터널 가상 프로젝트에 대한 설계 및 시공 시뮬레이션에서는 각 기관에서 수행된 연구결과를 참고하여 3차년도부터 가상의 공간을 설정하여 설계 및 복층터널의 시공시뮬레이션을 수행하여 본연구성과의 적용성과 기술적 융합성 등을 파악하여 향후 시행하고자하는 사업의 타당성을 분석하는 도구로 활용

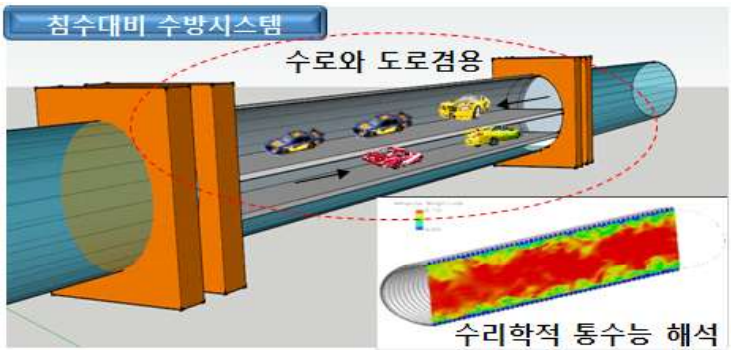
▸ **제5요소기술 : 복층터널 다목적 활용 설계 및 운영 기술**

◦ 다목적 복층터널의 교통/수로 활용을 위한 단계별 요소기술 및 조합설계기준 구축과 기능전환에 대한 안정적인 운영기술을 개발하고자 함.

◦ 다목적 복층터널의 복원력(resilience) 증진기술 개발에서는 다목적 복층터널의 반복 기능전환에 따른 복원력 저하를 방지하여 설계수명기간 동안 성능을 보장하는 기술을 개발하고자 함.

◦ 복층터널의 수재해 관련 대책을 마련하여 재난 상황 발생 시 신속한 대응이 가능한 도심지 복층터널 수방 가이드라인 제시.

◦ 수로겸용 복층터널의 건설로 도심지 홍수저감을 위한 통수능 검토 기법 개발.

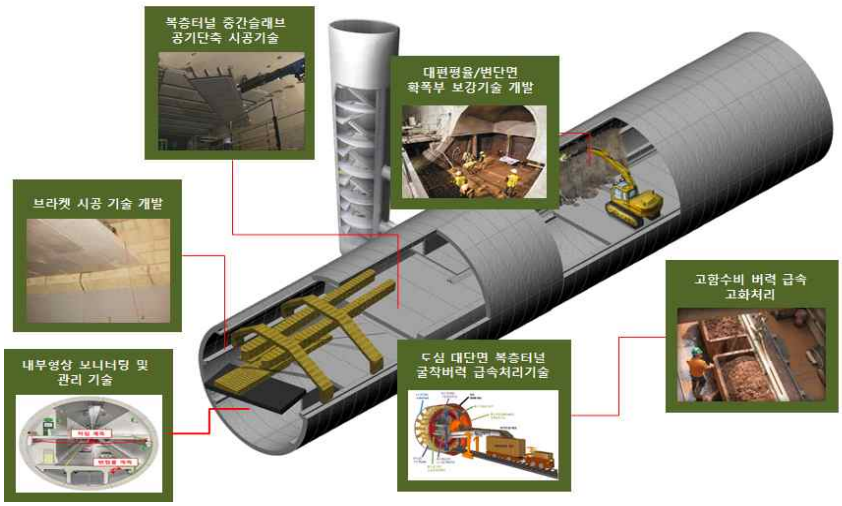


<수로겸용 복층터널의 수방시스템과 통수능 해석 예시>

■ 2세부 : 효율적인 복층터널 시공기술 개발

◦ 세계적으로 경쟁력을 갖춘 복층터널 건설을 위한 굴착 및 보강 등의 차별화된 기술을 개발하여 도심지 지하도로의 안전한 건설을 위한 미래형 복층터널 시공기술 개발을 목표로 함.

◦ 복층터널 굴착 및 보강 등의 차별화된 기술을 개발하여 대심도 복층터널의 경제적이고 안전한 터널 시공기술 개발하고, 대심도 복층터널에 대한 시공 및 운영중 안정성 확보와 복층터널 구조물의 안정성 확보를 위한 고유 핵심기술 개발.



▸ 제1요소기술 : 복층터널 최적화 시공을 위한 굴착 · 보강, 구조체 구축 및 유지관리 기술 개발과 Test-bed

◦ 대심도 복층터널에서 타 구조물과의 연결을 위해 시공되는 기존 터널의 확폭 및 분기부에 대한 굴착기술 개발을 목표로 확폭·분기부 굴착장비 설계기술과 굴착장비 제작기술을 개발하고자 함.

- 확폭·분기부 시공을 위한 중경암 대응 커팅헤드 어태치먼트 설계 기술
- 확폭·분기부 시공을 위한 셔블계 굴착기 어태치먼트 제작 기술
- 셔블계 굴착기와 커팅헤드 어태치먼트 연결 및 제어 기술

◦ TBM 장비를 이용한 터널시공시 본선터널 내부에 피난연락갱, 접속부, 확폭부 등을 설치하기 위하여 강재 세그먼트를 사용하고 있으며, 이러한 강재세그먼트는 제작 단가가 매우 높을 뿐만 아니라, 부대 비용과 공사기간이 많이 소요되는 작업임. 따라서 TBM 장비를 이용한 터널시공시 확폭·분기부 세그먼트의 시공/설계 단순화를 위한 세그먼트를 개발.

- 확폭·분기부 시공을 위한 특수 콘크리트 세그먼트
- 분기·확폭 시공을 위한 임시 구조물의 형태 및 임시구조물과 세그먼트 연결 방법

◦ 그라우팅 재료 개발 및 초소형 혼합 믹서 개발에서는 1일 21MPa이상의 고강도 발현이 가능하고, 급결성능을 확보할 수 있는 그라우트 기술개발을 목표로 함.

- 균열부 주입성능 실험을 통한 재료 평가 및 주입 공정 개발
- 제한적인 공간에서 시공을 위해 기존 믹서의 50%이하 용적의 그라우트 소형화 기술 및 믹서개발
- 기존믹서의 성능개선 및 개조을 통한 1.5shot그라우트 주입시스템 설계

◦ 복층터널 대평평율/변단면 확폭부 보강기술을 개발하여 복층터널 구조물의 안정성을 확보하기 위한 기술개발에서는 다음과 같은 기술을 개발하고자 함.

- 확폭/변단면 구간에 대한 사전보강으로 터널의 확폭 공사중 및 운행중 복층터널 구조물 자체의 안정성 확보 기술 개발.
- 확폭/변단면 구간의 단면 형상에 따른 보강 방안 검증을 통한 변단면 확폭 구간에 대한 최적 보강 기술 개발
- 공사중 및 운영중 안정성 확보를 위한 최적 방법에 대한 시공방안 및 보강범위 선정을 위한 기술 개발

◦ 복층터널의 중간슬래브 구축에 있어서 공기를 단축하기 위해 제작기술과 가설기술 및 장비를 개발하여 기존의 크레인을 이용한 가설방식에 비해 공정속도를 2배 이상 향상시킬 수 있는 시공기술 및 장비를 개발하고자 함.

- 중간슬래브 제작기술은 운반조건에 따른 시공성을 고려한 현장 및 공장제작기술을 개발.
- 위치별(환기용/도로용/수로용) 중간슬래브의 가설기술을 개발하고, 시공속도향상을 위한 가설장비의 개발.
- 개발된 장비를 고려한 공정계획 작성하고, 현장여건과 시공속도향상을 고려한 가설장비의 시제품을 제작개발.

◦ 슬래브와 터널 구조물을 연결해 주는 브라켓은 터널 본체의 시공법에 따라서 일체화 또는 분리시공에 따른 시공성이 고려된 확실한 부재력 전달이 가능한 구조로 개발될 것이며, 특히 슬래브와 브라켓의 연결방식, 브라켓이 설치되는 터널 라이닝의 보강방식 등을 성능시험을 통해서 개발하고자 함.

- 현장제작 및 부착형 브라켓 시공기술의 개발
- 브라켓과 슬래브 연결조건에 다른 성능 및 시공기술을 시작품 제작과 성능시험을 통해서 개발.

-Test-bed를 이용한 최적화된 브라켓 시공기술을 시연/성능 확보

◦ 복층터널 슬래브를 고려한 고성능 복합 터널 라이닝 기술 개발에서는 복층터널을 위한 슬래브를 설치하기 위해 경제적이고 안정성이 확보되는 브라켓 개발을 목표로 하고, 슬래브 설치 방법에 따른 라이닝 거동 분석과 이를 통한 보강 방안 및 복합 고성능 라이닝의 개발을 목표로 함.

◦ 복층터널 지중 분기부 및 합류부에 발생되는 초근접(0.1D~0.2D) 필라부 및 본선터널과 분기터널의 위치관계에 따라 발생되는 지반구조상 취약부, 그리고 복층터널 유출입부 등 특수부 안정성 확보 기술 개발하고자 함.

◦ 대심도 복층터널의 시공/공용 중 내부 슬라브 처짐 및 변형률을 실시간 계측할 수 있는 내부형상 모니터링 기법 및 이를 이용한 내부형상 관리 기술 개발

◦ 대단면 복층터널의 정보화를 위한 BIM 플랫폼과 FEM 솔버를 통합한 복층터널의 안정성 해석 프로그램 개발 및 유지관리 기법 개발을 통한 대단면 복층터널의 생애전주기 정보화 및 안정성 통합 관리 기술 개발하고자 함.(그림 참조, 대단면 복층터널의 생애전주기 정보화 및 안정성 통합 관리 기술 개발 예시)

◦ 공간(분기구, 본선, 진입구)과 구조(라이닝, 중간슬래브) 담당 과제 연구진으로부터 ①상시운영중 ②화재 및 비상 발생시 발생 될 수 있는 안정성 및 유지관리 내용을 취합하여 유지관리 가이드라인 총괄 작성 및 복층터널 성능중심의 평가기술 항목 (변상, 안전성, 내구성, 기능성) 개발.

◦ Test-bed 적용을 통한 연구단 개발 기술의 현장 적용성 검증 및 보완에서는 다음과 같은 기술의 성과물을 적용하여 현장검증 및 보완으로 개발 기술의 완성도를 높이고자 함.



<TestBed 예정 개념도 (한국건설기술연구원 SOC실증센터 내 위치)>

▶ 제2요소기술 : 도심 대심도 수직구의 친환경 시공기술 개발

◦ 수직구 벽체 구조물 1일 상승속도가 4m이상 가능한 히팅 슬립폼장치 개발

◦ 수직구 내부 SLAB 및 계단, 브라켓 조립공법 개발

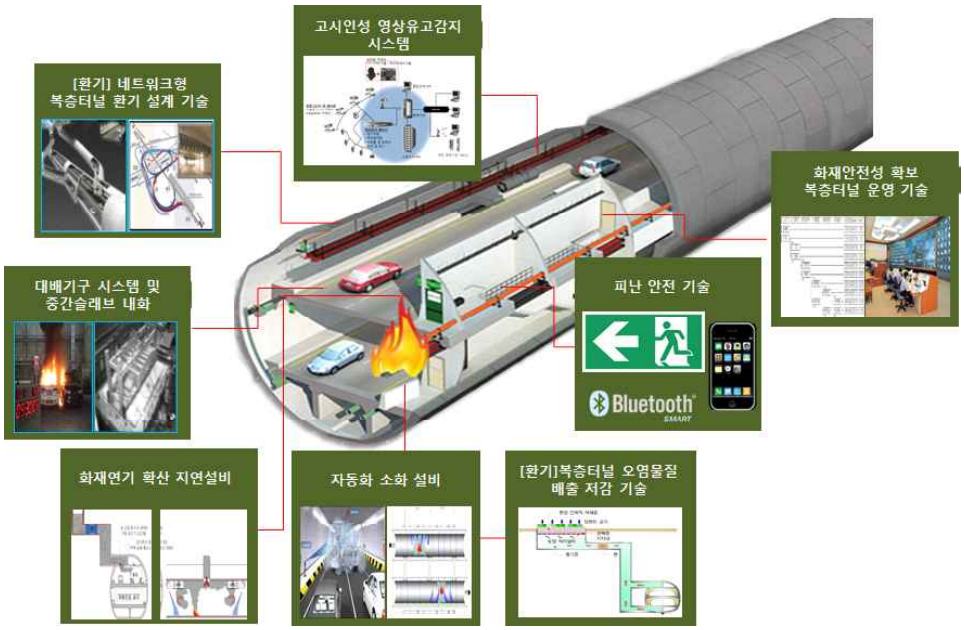
◦ 도심 대심도 수직구 작업자 운송장치 개발

▶ 제3요소기술 : 도심 대단면 복층터널 고함수비 굴착버력 친환경 급속처리기술 개발

◦ 도심지에서 시공하는 대단면 복층터널의 고함수비 굴착버력의 워커빌리티 개선을 위한 굴착버력 친환경 급속처리기술 개발하고자 함.

■ 3세부 : 복층터널 환기 및 및 화재안전 설계 기술 개발

◦ 안전하고 쾌적한 대심도 복층터널 구축을 위한 환기 및 화재안전 기술 확보임. 대도심의 효율적 활용을 위한 프랑스 A86, 다목적 활용도를 추구한 말레이시아 스마트 터널, 국의 도로와 Metro system을 결합 복층터널 등 대심도 복층터널 건설 시장이 확대되어감에 따라 이에 따른 환기 및 화재안전 설계 핵심 기술력 확보는 중요한 연구개발분야로 대두되고 있음.



▶ 제1요소기술 : 복층 네트워크형 터널의 네트워크형 환기 설계 및 해석 기술

◦ 복층 네크워크형 터널의 최적 환기설계를 위한 인자를 도출하고 다양한 사례연구 및 Scaled model 실험을 통한 적용성을 검토하고, 이를 바탕으로 환기설계 지침 제시

- 국외의 복층터널 환기설계사례를 조사하고 분석하여 국내연구에 부합하는 환기설계인자를 결정.
- 복층터널 환기 설계 인자에 대한 설계치를 도출하고 적용성 검토를 위하여 Scaled model 실험을 통해 중요한 환기설계 인자 결정.
- 복층터널 분기부 및 접속부에서의 기류예측을 위한 수치해석 및 Scaled model 실험을 통한 적용성 검토.
- 장대터널의 경우 횡류식 환기방법이 효과적임에 따라서 횡류식 환기방법 적용을 위한 수직갱의 설계 및 송풍기의 경제적 활용방안 기술개발
- 네트워크형 복층터널 환기설계 시 주요 환기방식별 모범환기설계 사례 제시

◦ 네트워크형 복층터널 환기시스템 성능을 예측하고 적정한 설계 사양을 공학적으로 해석할 수 있는 알고리즘 및 소프트웨어를 개발 함.

▶ 제2요소기술 : 복층터널내 오염물질 제어기술 및 외부 배출 방지 기술

◦ 복층터널의 환기시스템 설계에 가장 기본이 되는 차종별 오염물질 배출량 기준 및 환기량 산정방안 제시

- 복층터널에 운행될 것으로 예상되는 소형차량에 대해 정속주행시 주행속도별 오염물질 배출량을 실측을 통한 기준배출량 검토
- 터널 환기량 산정을 위한 차종별 오염물질 기준배출량 산정 모델제시

◦ 대형화 될 가능성이 높은 환기기 운전동력을 최소화하기 위하여 환기기 운전단계 산정방안 및 환기기 운전제어로직 개발

- 복층터널에 적용 가능한 환기방식에 대한 환기기 운전단계 최적화 방안 수립
- 환기기 자동제어로직 평가방안 구축
- 운전동력 최소화를 위한 자동제어 알고리즘 개발

◦ 환기탑 최적화 방안

- 환기탑 구조에 따른 주변 환경 영향 분석을 통하여 환기탑 설치 방안 연구수행.
- 환기탑 풍속에 따른 영향 검토
- 환기탑 배출 방향에 따른 영향 검토
- 환기탑 높이에 따른 영향 검토
- 오염물질 주변 환경 영향 최소화를 위한 환기탑 적용 방안 도출

▶ 제3요소기술 : 복층터널 화재확산 제어 및 내화 성능 향상 기술

◦ 안전한 복층터널 구현을 위하여 화재 및 연기확산을 제어할 수 있는 기술을 개발하고, 화재시 복층터널의 중간 슬래브의 내화 성능을 확보 방안과 화재 후 손상 평가/보수 보강 기술을 제시함으로써 복층터널의 화재 안전성 향상 기술 개발을 최종 목표로 함

- 실규모 자동차 연소 실험을 통한 설계화재강도 제시
- 화재시 연기 배출 향상을 위한 화재연동형 대배기구 시스템 및 배연 매뉴얼 작성
- 복층터널 중간슬래브 등 터널 구조부재 내화성능 확보 기술 개발
- 복층터널 중간슬래브 화재 후 손상 평가기술 및 보수/보강 기술 개발



<자동화 소화설비 작동 개념도>

◦ 복층터널에 차량화재 발생시 화재 지역에 회전이 가능한 초기 화재진압장치 및 직접적인 인력 투입없이 원격으로 구동이 가능한 제어장치로 구성된 복층터널용 원격 자동 소화설비를 개발하여, 비상시 신속한 소화활동으로 구조물/인명 피해최소화 및 기존 설비 대비 경제성을 갖춘 방재시설개발을 최종목표로함

- 화재진압 자동화 소화설비 장치제작 및 성능검증 (실규모 및 Test Bed)
- 경제성 확보가 가능한 옥내소화전용 자동화 소화설비 시제품 개발
- 자동화 소화설비 매뉴얼 개발

◦ 네트워크형 복층터널에서 화재사고 발생시 인명사고와 물적 피해를 최소화하기 위해 화재 초기에 연기 확산 속도를 지연시켜 줄 수 있는 화재연기 확산지연장치 및 시스템을 개발

- 스프링 탄성을 이용한 화재연기 확산지연장치 시제품을 개발하여 공장 테스트 후 성능실험을 위해 건설기술연구원 화재안전연구소(화성) 터널 실험동 내부에서 화재연기 확산지연장치 미작동시와 작동시에 대하여 실험을 실시 하여, 커튼 전·후방에서의 온도차를 분석한 결과 확산지연장치 작동시 최고 약 102℃~7.1℃ 까지 차이가 발생하는 것으로 분석.
- 화재연기 확산지연장치 운반 및 설치, 유지관리 수행방법, 화재연기 확산지연장치 작동순서에 대하여 유의사항 가이드 라인 작성.
- 지연장치 유지관리시 일상점검, 통상점검, 정기점검, 임시점검, 이상시 점검을 주기별로 수행하여 장비의 이상 유무를 점검.



1단계 : 차량 사고 발생 | 2단계 : 화재감지 후 포소화 설비 노즐부 회전 | 3단계 : 화재방향 분사 및 초기화재 진압

<단계별 원격 자동 소화설비 작동 시나리오>

▶ 제4요소기술 : 복층터널 화재안전 평가 및 관리시스템 구축

◦ 대심도 복층터널 위험요인 및 터널 사고결과분석을 통한 화재 시나리오 정립

◦ 소화설비 적용가능 (정량적)안전성 평가 방법론 제시

◦ 대심도 복층터널 안전성 확보를 위한 운영방안 수립

◦ 터널내부에 IEEE802.15.1(Bluetooth 무선통신 기술) 기반의 무선 network을 구축하여 터널 내부에서 화재 발생시, 스마트폰에 장착된 Bluetooth chip과 연동하는 어플(application)을 개발함으로서 터널에 설치된 피난 대피처까지 운전자

와 동승자를 안내함은 물론, 터널내부 및 피난대피소에 대피한 조난자가 있음을 외부로 지속적으로 알림으로서 사고 후에도 안전하게 구출될 수 있는 재난대처시스템을 개발.

◦ WPAN망을 통한 감시 시스템 구축으로 별도의 module없이 스마트폰 기본사양에 의한 무선측위가 가능한 스마트 피난경보 시스템 개발.

◦ 복층터널 특성 반영이 가능한 영상유고감지시스템과제는 본 과업을 통하여 전용 감지기 기반이 아닌 범용 CCTV 기반의 터널 영상유고 감지시스템을 개발하여 유고 이벤트와 동기된 실시간 CCTV 영상을 통합 관제할 수 있도록 함.

◦ MegaPixel 급의 디지털 고화질 영상을 적용하여 시스템 영상분석의 정확성을 향상함.

◦ 복층터널의 낮은 층고와 같은 구조물 특성에 따른 Local 영상감지기의 형태 및 취부 기계적 메커니즘을 설계함.

◦ 영상분석서버의 부하문제, 유출입부 및 터널내 조명 운영에 따른 오감지율 개선 및 CCTV 기반의 문제점인 운영자 조작(PTZ)에 따른 오감지 문제를 해결함.

◦ 최종적으로는 영상유고 분석 ASCI IC화 모듈 개발이 가능한 유고 분석알고리즘의 신뢰성 검증과 터널 내 영상유고감지시스템 운영시 요구되는 시스템 기능 및 기본 성능에 대한 표준화된 성능시험과 평가 방법을 정의함을 목적으로 함.

◦ 복층터널 환경에 특화된 영상유고감지 시스템의 부재(不在) 상황에서 설계 및 구현을 통한 기술적 진일보,

◦ 기존, 범용 CCTV 시스템 기반의 소프트웨어적 구현방식의 신뢰성 저하, 국외 전용장비기반의 구현방식은 경제성 측면의 요구수준을 만족하기 어려워, 보급 확대 제약.

◦ 따라서 모든 구현방식 지원, 신뢰성 및 경제성을 확보한 복층터널 영상유고감지시스템의 개발 및 보급 확대를 목적으로 함.

나. 성과목표 및 달성도

■ 1세부

구분	핵심성과 (level1)		단위성과 (level2)		총괄 성과점검기준						해당 기관	달성도
						질적 성과지표	목표치	측정방법	검증방법	가중치		
1세부	A	복층터널 최적화단면 설계기술 개발	A-1	분기부 최적화단면 설계가이드라인 제시	①	복층터널 설계 및 시공사례 조사	국내·외 사례 5개 이상	사례분석 제시여부	분석 보고서	0.5	(주) 삼보기술단	100
					②	최적단면 설계 기술검토	5개이상의 최적단면(안) 도출	최적단면 제시여부	보고서	0.5		100
					③	복층터널 표준단면 선정	표준단면 3개 이상 선정	표준단면도 면제시여부	보고서	0.5		100
					④	수치해석을 통한 최적화 단면 제시	최적화 단면 제시	최적화 단면 제시여부	보고서	0.2		100
					⑤	분기부 설계 가이드라인 제시	가이드라인 1건	가이드라인 제시여부	공개공청회	0.2		100
					⑥	복층터널 가상시뮬레이션 최적단면 설계검증	상세설계 수준의 단면설계(안) 1건	단면설계 제시여부	단면설계 보고서	0.3		100
			A-2	분기구간 복층터널 안정성 평가 및 굴착 설계 방안	①	설계관련 자료 수집	국내·외 5개 사례 이상	사례분석제 시여부	분석 보고서	0.3	동국대학교 산학협력단	100
					②	분기부의 다양한 터널 형상별 거동 분석	3개형상별 거동분석 결과제시	수치해석 , 축소모형시 험분석결과 제시여부	분석 보고서	0.4		100
					③	분기구간 터널 형상별 굴착 영향 분석	3개형상별 굴착영향 분석 결과제시	수치해석 축소모형시 험분석결과 제시여부	분석 보고서	0.3		100
					④	분기구간의 터널 안정성 평가 및 굴착 설계 가이드라인 제시	가이드라인 1건	가이드라인 제시여부	공개공청회	0.4		100
	B	복층터널 구조체 설계 및 성능평가 기술	B-1	복층터널 중간슬래브 설계기준(안) 및 조립지침(안)	①	중간슬래브 사례조사 및 설계/성능 요구조건 정립	국내·외 사례 5개 이상	사례분석 제시여부	분석 보고서	0.3	경희대학교 산학협력단	100
					②	중간슬래브 구조해석 모델 개발	구조해석 비교 모델 개발 2건 이상	구조해석모 델제시여부	보고서	0.3		100
					③	중간슬래브 최적단면 설계기술 개발	구조해석 보고서 1건	보고서 제시여부	보고서	0.3		100
					④	연결구조 설계 가이드라인 제시	중간슬래브 설계기준(안)1건	설계기준안 제시여부	공개공청회	0.8		100
					⑤	슬래브 접합부 조립 가이드라인 제시	중간슬래브 조립지침(안) 1건	조립가이드 라인제시여 부	공개공청회	0.4		100
					⑥	Mock-up Test bed (가상현장 상세설계) 적용	상세설계 1건	상세설계 제시여부	보고서	0.4		100
			B-2	복층터널 중간슬래브 동적시험 절차서(안) 및 내진설계 가이드라인(안)	①	중간슬래브 국내·외 실험 사례 분석	국내·외 실험 사례 5개 이상	사례분석 제시여부	분석 보고서	0.3	한서대학교 산학협력단	100
					②	진동대(5m×5m, 30t on)시험 수행	진동대실험 하중조건 2건 이상	실험결과분 석제시여부	시험결과보 고서	0.3		100
					③	실내모형 진동대 시험 수행	진동대실험 2건 이상	실험결과분 석제시여부	시험결과보 고서	0.3		100
					④	원심모형 시험수행	원심모형실험 2건 이상	실험결과 분석제시여 부	시험결과보 고서	0.3		100
					⑤	동적시험 가이드라인 및 조립가이드라인 제시	동적시험 및 조립 가이드라인 각 1건	가이드라인 제시여부	공개공청회	0.3		100
					⑥	Mock-up Test bed (가상현장 상세설계) 적용	상세설계 1건	상세설계 제시여부	보고서	0.2		100

구분	핵심성과 (level1)		단위성과 (level2)		총괄 성과점검기준						해당 기관	달성도
						질적 성과지표	목표치	측정방법	검증방법	가중치		
			B-3	슬래브 동하중 전파에 따른 구조물 응답특성 분석	①	중간슬래브 구조해석 가이드라인 제시	구조해석 가이드라인 1건	가이드라인 제시여부	보고서	0.1	(주) 브이테크	100
					②	취약부(터널접속부, 연결부 및 중간슬래브 등)에 대한 동적 거동특성 파악 및 분석	취약부 거동특성 분석결과 제시	분석결과 제시여부	분석 보고서	0.1		100
					③	복층터널 최적화를 위한 수치해석	수치해석 결과제시	수치해석 결과 제시여부	보고서	0.1		100
	C	복층터널 근접시공 안정성 확보를 위한 설계기술	C-1	도심권역 특성에 맞는 맞춤형 복층터널 지보/보강 설계기술	①	국내·외 지보/보강 설계기술 사례 분석	국내·외 사례 5개 이상	사례분석제시여부	분석 보고서	0.4	㈜대흥미래기술	100
					②	실내모형시험 제작 및 수행	변수조건 3가지 이상	설계 도면 및 보고서 제시여부	보고서	0.6		100
					③	도심권 지보/보강 공법별 안정성 평가	2종류 이상 공법별 안정성 평가	평가결과제시여부	보고서	0.5		100
					④	지보/보강 공법(안) 안정성 평가 및 표준도서	수치해석 평가결과 및 표준도서	보고서작성 여부	보고서	0.5		100
			C-2	대단면 복층터널의 근접시공 안전도 평가기술	①	국내·외 근접시공 평가 및 시험사례 분석	국내·외 사례 5개 이상	사례분석 제시여부	분석 보고서	0.2	한양대학교 산학협력단	100
					②	지하수 영향 예측 변수 조건 분석	변수조건 3가지 이상	분석결과 제시여부	분석 보고서	0.5		100
					③	설계차트 정립	인접구조물 종류에 따른 설계차트 2건 이상	설계차트 제시여부	보고서	0.3		100
					④	지상구조물에 미치는 영향 분석 실내모형시험 제작 및 수행	실내모형실험 분석 결과제시	분석결과 제시여부	분석 보고서	0.5		100
					⑤	근접시공 설계가이드라인 제시	근접시공 가이드라인 1건	가이드라인 제시여부	공개 공청회	0.2		100
					⑥	Mock-up Test bed (가상현장 상세설계) 적용	상세설계 1건	상세설계 제시여부	보고서	0.3		100
	D	복층터널 내부시설 운전자 친화 설계 기술개발 및 가상 프로젝트	D-1	복층터널 운전자 친화설계 (입체표지판, 조명시스템)	①	입체표지판/ 조명시스템 기술 조사	국내외 사례 각 5개 이상	사례분석 제시여부	실험보고서	0.5	동일기술 공사	100
					②	입체표지판 시인성(1차)및 조명시스템 집광효율 평가	각 기존대비 20%향상 및 30% 향상	실험결과 제시여부	실험보고서	0.5		100
					③	입체표지판 시인성(2차) 및 조명시스템 집광부 빛의 직진성 평가	20%향상 (기존대비) 및 10m이상	보고서	실험보고서	0.6		100
					④	입체표지판 및 조명시스템 가이드라인 제시	설계/시공/ 유지관리 가이드라인 각1건	가이드라인 제시 여부	실내실험 및 전문가 검증	0.8		100
					⑤	입체표지판 현장 또는 실규모 터널 적용	국내유사터널 적용 1건	유사현장 적용여부 및 성능검증	적용 보고서	0.1		100
					⑥	조명시스템 현장 또는 실규모 터널 적용	국내유사터널 적용 1건	유사현장 적용여부 및 성능검증	적용 보고서	0.4		100

구분	핵심성과 (level1)		단위성과 (level2)		총괄 성과점검기준						해당 기관	달성도
					질적 성과지표		목표치	측정방법	검증방법	가중치		
			D-2	복층터널 운전자 친화설계 (타일대체용 친환경 불연도료)	①	불연도료 성능시험 최적배합비 도출	- 중금속 함유량 :0.05무게%(500 mg/kg)이하 - 1000℃ 온도 유독가스 무배출	시험결과 제시여부	공인성적서	0.2	(주) 엔세라텍	100
			D-3	복층터널 가상시뮬레이션	①	가상시뮬레이션 기본제원 수집	각기관수집량 (70%이상)	기본제원 수집여부	보고서	0.3	(주) 골든엔지니어링	100
					②	복층터널 가상시뮬레이션 수행	가상설계 1건	최종 가상설계보고서	보고서	0.3		100
					①	복층터널 가상시뮬레이션 수행	가상설계 1건	최종 가상설계보고서	보고서	0.3		100
					③	복층터널 가상시뮬레이션 수행	시뮬레이션 모델링 1건	최종 가상시뮬레이션	보고서	0.2		100
	E	복층터널 다목적 활용 설계 및 운영 기술	E-1	조합설계기준 및 유지관리 가이드라인	①	도로+수로 조합설계 가이드라인 제시	가이드라인 1건	가이드라인 제시여부	공개 공청회	0.1	다산컨설턴트	100
					②	운영 및 유지관리를 위한 모니터링 가이드라인 제시	가이드라인 1건	가이드라인 제시여부	공개 공청회	0.3		100
					③	홍수 시(도로의 수로 전환 시) 안전관리 프로그램구축	안전관리프로그램 1개	프로그램시연여부	공개 공청회	0.3		100
			E-2	복원력 증진기술 가이드라인	①	국내·외 사례 및 문제점 사례 분석	국내·외 5개 사례 이상	사례분석 제시여부	분석 보고서	0.2	건국대학교 산학협력단	100
					②	다목적 복층터널 방배수 체계 분석	실내 기초 시험 2건 시뮬레이션 분석 각 2건이상	분석결과 제시여부	보고서	0.2		100
					③	복원력 평가지표 정립	평가지표 1건이상	평가지표제시여부	보고서	0.2		100
					④	복원력 증진방안 개발	증진방안 제시 1건	증진방안 제시여부	보고서, 공개 공청회	0.2		100
					⑤	운영가이드라인 제시	운영 가이드라인 1건	가이드라인 제시여부	보고서	0.1		100
					⑥	모형실험을 통한 검증	모형실험 1건이상	가이드라인 적용여부	적용 및 결과 보고서	0.1		100
			E-3	수로 겸용 수로 겸용 복층터널의 수방기법 및 통수능 검토 기술	①	복층터널 건설 현황 및 설계 기법 조사	사례 5개 이상	사례분석제시여부	분석 보고서	0.5	호서대학교 산학협력단	100
					②	수리실험을 통한 복층터널 내 통수능 검토	통수능 검토를 위한 수리실험 결과 1건이상	실험결과 보고서 제출여부	보고서	0.5		100
					③	수재해 영향 평가를 위한 수치해석	상황별(2건이상) 수치해석 결과 제시	수치해석 결과 제시여부	보고서	0.3		100
					④	터널 유입량 추정 알고리즘 개발	알고리즘 1건 이상	알고리즘제시여부	보고서	0.3		100
					⑤	모형실험을 통한 검증	모형실험 1건이상	가이드 라인 적용여부	적용 및 결과 보고서	0.2		100
					⑥	모형실험을 통한 검증	모형실험 1건이상	가이드라인 적용여부	적용 및 결과 보고서	0.2		100
계										20		

■ 2세부

구분	핵심성과 (level1)		단위성과 (level2)		총괄 성과점검기준						해당 기관	달성도
						질적 성과지표	목표치	측정방법	검증방법	가중치		
2세부	A	복층터널 최적화 시공을 위한 굴착·보강, 구조체 구축 및 유지관리 기술개발과 Test Bed	A-1	복층터널 최적화 시공을 위한 기술 개발	①	확폭 및 분기부에 사용가능한 비용 절감형 콘크리트 세그먼트 개발	기존 강재대비 비용 30% 절감형 콘크리트 세그먼트	비용절감분석결과 제시여부	경제성 분석 보고서	0.6	한국건설기술연구원	100
					②	확폭 및 분기부 굴착장비 설계 기술 개발	지반강도 80MPa에서 작업속도 15m3/h 이상 커팅헤드 어테치먼트 설계도 1건	설계도 제시여부	설계도	0.6		100
					③	초소형 혼합 믹서 개발	기존 2액형 3조식 믹서 체적의 50% 이하	장비 제작 및 시연 여부	시제품	1		100
			A-2	Test Bed 구조체 제작	①	Mock-up TB 구조체 제작	Mock-up TB 1건 이상	Mock-up TB 구조체 제작 여부	Test - Bed 구축 보고서	3		100
			A-3	복층터널 확폭 및 분기부 굴착장비 제작	①	확폭 및 분기부 굴착장비 제작	지반강도 80MPa에서 작업속도 15m3/h 이상 커팅헤드 어테치먼트 장비 1건	장비 제작 및 시연 여부	작업속도 검증 보고서	1.8	영일공업	100
			A-4	슬래브를 고려한 고성능 복합 라이닝 기술개발	①	비용 절감형 브라켓 일체형 라이닝	기존 분리형 브라켓·라이닝 대비 브라켓 비용 15% 절감	비용절감분석결과제시여부	경제성 분석 보고서	1.1	㈜지윤이앤씨	100
			A-5	고강도 친환경 그라우트 제조기술 개발	①	조기 고강도 발현형 그라우트 재료 개발	1일강도 21MPa 이상 1.5액형 그라우트 재료	시제품 제시 및 시험결과 제시여부	시제품, 시험성적서	1.3	JNTINC	100
			A-6	대편평율/변단면 확폭부 보강기술 개발	①	국내외 변단면 보강기술 사례 분석	국내외 사례 5개 이상	사례분석제시여부	분석 보고서	0.4	단우기술단	100
					②	변단면 보강 공법별 안정성 평가	2건 이상의 공법별 안정성 평가	평가결과제시여부	보고서	0.2		100
					③	변단면 안정성확보기술	3D 안정성분석 3건	평가결과 제시여부	보고서	0.2		100
			A-7	복층터널 슬래브 및 브라켓 시공기술 개발	①	국내외 중간슬래브 시공 사례조사	국내외 사례 5개 이상	사례분석제시여부	분석 보고서	0.1	(주)홍지	100
					②	중간슬래브 공기 단축 평가	현장타설공법 대비 제작공기 40% 향상	공기분석자료 제시여부	공기절감분석보고서	0.3		100
					③	중간슬래브 횡방향 보강 성능 평가	기존 습식전단키 공법 대비 횡방향 보강성능 30% 향상	비교 실험결과 제시여부	결과 보고서	0.4		100
					④	시공속도 향상형 중간슬래브 가설장비 제작	기존 크레인을 이용한 가설공법 대비 시공속도 40% 향상	비교 실험결과 제시여부	시제품 및 시공속도 검증 보고서	1.30		100
					⑤	시공속도 향상형 브라켓 시공법 성능시험	기존 RC 현장타설 제작공법 대비 시공속도 30% 향상	비교 실험결과 제시여부	시공속도 분석 보고서	0.4		100
					⑥	브라켓 시공을 위한 라이닝 천공장비의 개발·제작	천공 속도 50% 향상	현장시험	시제품	0.3		100

구분	핵심성과 (level1)		단위성과 (level2)		총괄 성과점검기준						해당 기관	달성도
						질적 성과지표	목표치	측정방법	검증방법	가중치		
			A-8	취약 특수부 (분기부/유출입부) 안정성 확보 기술 개발	①	국내외 취약 특수부 (지중 분기부/ 유출입부/ 근접굴착) 사례조사 및 분석	국내외 사례 5개	사례분석제시여부	보고서	0.1	롯데건설	100
					②	취약특수부 (분기부 필라/ 유출입부) 보강기술 개발	암반등급 및 분기부 이격에 따른 보강방법 3건 이상 제시	설계도 및 해석 보고서	보고서	1		100
					③	Mock-up TB 적용 또는 유사 현장 적용	Mock-up TB 또는 유사현장 적용 1건	적용여부	적용 보고서	0.6		100
			A-9	내부형상 모니터링 및 관리 기술 개발	①	기존 형상 계측기법 동향 분석	최근 5년 이내 기술 동향 분석	기술동향 분석결과제시여부	분석 보고서	0.1	성균관대학교산학협력단	100
					②	내부형상 계측 (레이저스케너+ 국부계측) 오차율 감소기법 개발	형상 정보 오차율 10% 이내	오차율 측정실험결과 제시여부	실험 보고서	0.4		100
					③	내부형상 시각화 알고리즘 제시	시각화 알고리즘 S/W 1건 등록	S/W 등록 여부	공개공청회	0.1		100
					④	내부형상 모니터링 프로그램	내부형상 모니터링 프로그램 S/W 1건 등록	S/W 등록 여부	공개공청회	0.1		100
			A-10	대단면 복층터널의 생애전주기 정보화 및 안정성 통합 관리 기술 개발	①	복층터널 전용 BIM+FEM 프로그램	프로그램 S/W 등록 1건	S/W 등록 여부	공개 공청회	0.4	인하대학교 산학협력단	100
					②	복층터널 공간 및 구조별 성능중심의 유지관리 가이드라인 (체크리스트)	유지관리 가이드라인 (체크리스트)1건	가이드라인 제시여부	공개 공청회	0.2		100
	B	복층터널용 수직구 히팅 슬립폼 장치 개발 및 프리캐스트, 계단 조립식 시공 기술	B-1	복층터널용수직구용 히팅 슬립폼, 개구부 연결구조검토 및 Bracket 시공기술	①	시공속도 향상형 브라켓 시공기술	현장타설 공법 대비 시공속도 20% 이상 향상	시공속도향상분석결과 제시여부	시공속도평가 보고서	1	(주) 하경엔지니어링	100
			B-2	복층터널용 수직구 히팅 슬리폼 장치, 작업자 운송용 장치 개발	①	시공속도 향상형 히팅 슬림폼 장치 개발	현장타설 공법 대비 시공속도 30%이상 향상 (1일 4m 상승)	시공속도향상분석결과 제시여부	시공속도평가 보고서	1.3	(주) 네오시티	100
			B-3	복층터널용 수직구를 고려한 pc slab 및 조립식 계단 시공기술	①	시공속도 향상형 조립식 계단 시공기술 개발	현장타설 공법 대비 시공속도 30% 이상 향상 (1일 3m 상승)	시공속도향상분석결과 제시여부	시공속도평가 보고서	1		100
	C	도심 대단면 복층터널 고함수비 굴착버력 처리 기술 개발	C-1	갱내에서의 굴착버력 탈수공법 개발	①	굴착버력 함수비 저감기술 개발	갱내에서의 굴착버력 함수비 50%이내 처리	시험 결과 제시여부	시험결과 보고서	0.4	포스코건설	100
			C-2	고함수비 굴착버력의 갱외 소규모 장비를 이용한 처리공법 개발	①	굴착버력 고화시간 감소 기술 개발	굴착버력 발생 후 고화처리 시간 4시간 이내	시험 결과 제시여부	시험결과 보고서	0.3	케미우스코리아	100
계										20		

■ 3세부

구분	핵심성과 (level1)		단위성과 (level2)		총괄 성과점검기준						해당 기관	달성도
						질적 성과지표	목표치	측정방법	검증방법	가중치		
3세부	A	복층터널 네트워크형 환기설계 및 해석 기술	A-1	네트워크형 복층터널의 환기설계를 위한 설계인자도출	①	해외 복층터널 환기설계 사례 조사	핵심 설계인자 3건이상 조사	조사 보고서 작성여부	보고서	0.13	인하대학교산학협력단	100
						Sclaed model test를 통한 실험적 검증	실험적 설계인자 제시	설계인자 제시여부	보고서	0.07		100
						개발된 환기설계 인자가 적용된 환기설계 절차 및 사례집 제시	네트워크형 복층터널 환기설계 지침	설계지침 제시여부	설계지침 제시여부	0.19		100
						설계지침을 바탕으로 Test bed의 개발 S/W 활용 설계	S/W의 Test bed 모델	보고서 작성 여부	보고서	0.10		100
				설계인자 적용을 위한 Scaled test 및 현장적용 test	②	Scaled model 설계 및 제작	분기부 및 합류부에서의 Shockloss 도출 및 검증	설계결과 제시여부	보고서	0.18		100
						설계인자 적용가능성 검토	네트워크형 터널에서의 기류예측 및 각종 유동계수 정량화	실험결과 제시여부	보고서	0.07		100
						개발된 환기설계 기술을 적용한 모델터널 환기설계	모범환기설계사례집	사례집 제시여부	보고서	0.24		100
						Test-Bed의 환기설계 기법 적용	Test-bed의 환기설계	현장 실험 여부	보고서	0.10		100
					③	소형차 전용 환기설계 기술	소형차 전용 복층터널의 환기설계 인자 도출		보고서	0.19		100
			A-2	네크워크 터널환기 모델 및 3D CFD 연계 기술 정립 및 모듈개발	①	터널내 유동 및 오염농도 예측 기술 사례 및 요구기능 (알고리즘) 조사	사례 및 요구기능조사 5건 이상	보고서	보고서	0.39	제이에스시 솔루션	100
						터널내 유동 및 오염농도 예측치	유동 및 오염농도 예측치 95%이상 정확도	터널계측치와 비교 및 국외S/W 결과와 비교결과제시여부	비교 보고서	0.24		100
			A-3	네트워크형 복층터널 환기 해석을 위한 전후처리 모듈 개발	①	네트워크형 복층터널 환기 해석을 위한 전처리 모듈 기술 사례 및 요구기능 조사	사례 및 요구기능조사 5건 이상	보고서	보고서	0.07		100
						네트워크형 복층터널 환기 해석을 위한 전처리 모듈 기능확인 및 검증	DXF, GRID 호환성 90% 이상	프로그램 및 알고리즘 제시 및 시연	공개 공청회	0.19		100
					②	네트워크형 복층터널 환기 해석을 위한 후처리 모듈 기능확인 및 검증	오염농도 1ppb 이상 CO 1 ppm 단위 및 가시도 10m 구현	프로그램 제시 및 시연	공개 공청회	0.68		100

구분	핵심성과 (level1)		단위성과 (level2)		총괄 성과점검기준						해당 기관	달성도
						질적 성과지표	목표치	측정방법	검증방법	가중치		
	B	복층터널 오염물질 확산 예측 및 외부 배출 방지 기술	B-1	대상차종에 대한 환기량 산정용 오염물질 배출량 기준 DB		현재 터널환기량 계산을 위한 오염물질 산정기준 분석	오염물질 산정기준 5개국 이상 분석	기준수집 및 분석	보고서	0.07	신한대학교산학협력단	100
					①	터널환기량 계산을 위한 차종별 오염물질 배출량 측정방법	오염물질 배출량 3건 이상 분석	전문가 자문을 통한 타당성검증	보고서	0.28		100
						오염물질 배출량 실험	대상차종 6종이상 분석	실험결과제시여부	결과 보고서	0.13		100
			B-2	조합환기 system에 대한 자동제어 알고리즘	①	자동제어알고리즘에 의한 운전동력비 절감	제어로직 적용에 따른 운전비용 시뮬레이션 결과 동력비 20% 절감	동력비 절감결과 제시여부	동력비 분석 보고서	0.56		100
							현장적응성 평가	현장평가결과	현장평가결과에 대한 자문	0.19		100
			B-3	복층터널 오염물질 외부배출 영향 최소화 기술 개발		저감기술 사례조사	저감기술 사례 3건 이상 조사	조사 보고서 제시여부	보고서	0.15	범창종합기술	100
					①	오염물질 영향범위 저감	영향범위 15% 이상 저감	모형실험 결과제시	보고서	0.24		100
						환기탑 설계 매뉴얼(안)	환기탑 설계매뉴얼 (안) 작성	매뉴얼 (안) 제시	보고서	0.10		100
					②	환기탑 모델 제시	모델작성 3건이상	전산해석 및 보고서 제시여부	보고서	0.29		100
			B-4	복층터널 환기성능 개선을 위한 대배기구 포트 최적화 기술 개발		포트설치 사례조사	포트설치 사례 2건 이상 조사	조사 보고서 제시여부	보고서	0.10		100
					①	대배기구 포트 최적화 프로그램개발을 통한 오차범위 최소화	오차범위 15% 이하	전산해석 및 현장측정	보고서	0.39		100
						프로그램 최적화	오차범위 10% 이하	현장측정 결과제시	보고서	0.10		100
	C	복층터널 화재확산 제어 및 내화성능 향상 기술	C-1	복층터널 설계화재강도 제시	①	실규모 자동차 연소실험 DB 구축	DB 구축 평가시험 4건 이상	평가결과 제시여부	공인 성적서	0.41	한국건설기술연구원	100
			C-2	화재 연동형 대배기구 시스템 기술 개발		대배기구 시스템 설계	제연효율 90% 이상	시험결과 제시여부	보고서	0.43		100
					①	복층터널 화재대응 시스템 실규모 실험	대배기구 및 자동소화 설비 등 복층터널 화재대응 시스템 실규모 실험 3건 이상	성능평가	시작품 모형실험	0.43		100
					②	화재연동형 대배기구 시스템 시작품 제작	화재연동형 대배기구 시스템 개발	성능평가	시작품 모형실험	0.97		100
					③	화재 연동형 대배기구 메뉴얼 작성	대배기구 메뉴얼 제시	메뉴얼 제시 여부	메뉴얼 논문	1.02		100
					④	화재 연동형 대배기구 Test-Bed 적용	화재연동형 대배기구시스템 설계 사양서	현장 적용	특허출원 보고서	2.22		100

구분	핵심성과 (level1)	단위성과 (level2)		총괄 성과점검기준						해당 기관	달성도
				질적 성과지표		목표치	측정방법	검증방법	가중치		
		C-3	복층터널 중간슬래브 폭렬 저감형 PC슬래브 개발	①	내화성능DB 구축	DB 구축 평가시험 3건 이상	평가결과 제시여부	공인 성적서	0.07		100
				②	PC슬래브 폭렬저감기술 개발	내화시험 성능 평가 결과 내화 2시간 이상	내화시험 성능평가결 과제시여부	실험 보고서	0.10		100
		C-4	복층터널 중간슬래브 내화피복기술 개발	①	표준화재 대응 피복기술 개발	내화시험 성능 평가 결과 내화 2시간 이상	내화시험 성능평가결 과제시여부	실험 보고서	0.07		100
				②	실화재 대응 피복기술 개발	내화시험 성능 평가 결과 내화 2시간 이상	내화시험 성능평가결 과제시여부	실험 보고서	0.06		100
				③	내화피복 시공기술 개발	특기시방서 1건	시방서 작성 여부	공개 공청회	0.04		100
		C-5	중간슬래브 내화평가기준 제시	①	중간슬래브 화재규모 설정	화재강도 선정 1건	화재 시나리오 제시여부	보고서	0.06		100
				②	화재강도 및 평가기준 설정	평가기준 1건 작성	평가기준 작성여부	보고서	0.06		100
		C-6	복층터널 중간슬래브 내화설계지침 제시	①	복층터널 중간슬래브 내화설계 가이드라인 작성	내화설계 가이드라인 1건	가이드라인 작성 여부	공개 공청회	0.12		100
		C-7	중간슬래브 화재손상도 평가기술 개발	①	화재손상도 DB 구축	내화시험 2건 이상	DB 구축 여부	실험 보고서	0.12		100
				②	손상도 평가가이드라인 작성	평가가이드라인 1건	가이드라인 제시 여부	공개 공청회	0.12		100
		C-8	터널 화재 손상 구조물 보수기술 개발	①	보수/보강 가이드라인 작성	보수/보강 가이드라인 1건	가이드라인 제시 여부	보고서	0.15		100
				②	복층터널 화재 손상구조물 유지관리가이드라인 작성	유지관리 가이드라인 1건	가이드라인 제시 여부	공개 공청회	0.12		100
		C-9	복층터널용 화재연기 확산지연장치 개발	①	화재연기 확산지연기술에 대한 선행연구사례 및 기술조사	국내외 기술 수요 및 사례조사 3건	보고서 작성여부	조사 보고서	0.24	유원 컨설턴트	100
					연기확산 지연장치 작동원리 개념 정립 및 구동방안 개발	작동원리 개념 정립 및 구동방안 제시	CAD를 이용한 제작도면 작성여부	보고서	0.17		100
					화재연기 확산지연장치 및 설치방안 개발	시제품 제작 및 터널의 구조 형상에 따른 터널 내 설치방안 개발	시제품 및 설치방안 제시여부	시제품 개발	0.73		100
					연기확산 지연장치 Test-Bed 적용 및 성능실험 수행	종방향 기류속도 50% 저감가능한 최적 운영방안 제시	성능측정 실물실험 여부	측정보고서	0.58		100
				②	복층터널용 화재연기 확산지연장치 설치 및 시공가이드라인	설치 및 시공가이드라인 1건	가이드라인 제시여부	공개 공청회	0.24		100

구분	핵심성과 (level1)		단위성과 (level2)		총괄 성과점검기준						해당 기관	달성도
					질적 성과지표		목표치	측정방법	검증방법	가중치		
			C-10	소형차전용 복층터널의 화재진압용 원격 자동소화설비	①	분사노즐 최대분사거리	최대 분사거리 15m이상	시뮬레이션 분사실험	실험 보고서	0.10	(주) 동일기술공사	100
					②	회전식 본체구동부 회전방향 제어	실내구동 실험 10point이상	실험결과제시여부	실험 보고서	0.05		100
					③	원격 자동소화설비 메뉴얼	설계/시공/유지관리 매뉴얼 각 1건	가이드라인 제시여부	시제품 실험	0.39		100
			C-11	경제성을 갖춘 복층터널용 원격 자동소화설비 매뉴얼 개발	①	자동화 소화설비 현장적용	현장적용 1건 (국내유사터널)	현장적용여부	현장적용	0.09		100
					②	시공 및 유지관리비 절감효율	기존 물불무 설비 대비 20~30%절감	공사비 내역서	경제성 검토 보고서	0.09		100
		복층터널 화재안전 평가 및 관리시스템 구축	D-1	터널방재시스템 화재시나리오개발	①	국내외 터널 위험도 평가 방법 검토	터널 관련 사고사례 문헌조사 5건 이상	사고사례 제시여부	조사 보고서	0.05	포슝이앤알	100
					②	국내·외 운영 중인 복층 터널 조사	국외 복층 터널 관련 운영기관 및 현장 3개 이상 방문	운영사례제시여부	조사 보고서	0.20		100
					③	터널 화재시나리오 비교	복층터널 위험요인 2건 이상 도출	위험요인 도출여부	보고서	0.12		100
						복층터널 적용 화재시나리오 작성	시나리오 2건 이상	시나리오 제시여부	보고서	0.15	주성지앤비	100
			D-2	터널방재시스템 운영 매뉴얼 및 소프트 웨어 개발	①	정량적 안전성 평가 방법 개발	국내외 터널 소화설비 현황 분석 및 안전성 평가 방법론 도출	분석 및 도출여부	보고서	0.15		100
						user 중심의 운영 가이드라인 개발	운영 가이드라인 1건	가이드 라인 제시여부	가이드라인	0.15		100
						user 중심의 운영 가이드라인 전문가 검증	운영 가이드라인 1건	가이드 라인 제시여부	공개 공청회	0.24		100
			D-3	신속대피를 위한 스마트 피난경보앱 개발	①	위치기반 기술 사례조사	사례 5건 이상 조사	보고서 제시여부	보고서	0.28		100
						복층터널 특성을 고려한 피난안전성 검토	복층터널 내 피난안전성 확인 (대피공간 안전성 검토 및 대피 시나리오 고려)	보고서 제식여부	보고서	0.33		100
						무선 Network Hardware 시스템 개발	Bluetooth를 이용한 무선측위 시스템 개발	시제품 제작여부	시제품, 보고서	0.49		100
						스마트 피난경보앱 S/W 시연	안드로이드 어플마켓 등록	어플마켓 등록 여부	시연 보고서	0.41		100
					②	Test bed를 통한 사업화 연구	스마트폰 어플을 이용한 위치추적 어플 개발	스마트폰 앱 제작 여부	스마트폰 앱,	0.58		100

구분	핵심성과 (level1)	단위성과 (level2)	총괄 성과점검기준						해당 기관	달성도
				질적 성과지표	목표치	측정방법	검증방법	가중치		
		복층터널용 영상유고감지 시스템 S/W 개발	①	영상유고감지시스템 성능평가방법, 영상유고감지시스템효과분석 및 적용방안 제시 SW Block 설계	프로세스 및 데이터 분석 인터페이스 설계 데이터 모델링 1건 이상	아키텍 정의서, 요구기능 분해도 제시여부	분석서/ 시험 결과서	0.15	보임정보기술	100
				소프트웨어 블록설계	소프트웨어 블록설계 1건 이상	1차 시작품 측정	소프트 웨어	0.06		100
				소프트웨어 통합개발	소프트웨어 통합개발 1건이상	2차 시작품 측정	소프트 웨어	0.25		100
				통합시스템 시험	프로그램 개발 및 상용화 각 1건	전문가 검증 여부	분석서/ 시험결과서	0.49		100
	D-4	복층터널용 영상유고감지 시스템 H/W 개발	②	H/W기기 메커니즘 개념 설계	H/W기기 분해도 (안) 도출	아키텍처 정의서, 요구기능 분해도 제시여부	분석서/ 시험 결과서	0.11		100
				하드웨어 플랫폼 설계	하드웨어 플랫폼 설계 1건 이상	1차 시작품 컴퓨터 시뮬레이션 제시여부	시제품	0.12		100
				엔지니어링 시제품 제작	엔지니어링 시제품 제작 1건이상	2차 시작품 컴퓨터 시뮬레이션 제시여부	시제품	0.5		100
				가동시스템 설치	영상유고 감지장치 개발 1건	시험운영 결과서 제시여부	분석서/ 시험결과서	0.48		100
계								20		

다. 연구성과의 차별성

■ 1세부 : 복층터널 최적화 설계기술 개발

단위성과명	성과물 형태	기술수준	경제성	성과의 우수성	활용실적 및 방안
복층터널 표준단면 설계 가이드라인(안)	가이드라인	복층터널 표준단면 설계 가이드라인 → 관련기술 확보	복층터널 설계 가능 → 경제적 성과 창출을 위한 기반조성	복층터널 단면 설계를 위한 기초적 가이드라인 제시로 실무자에게 도움	현재 추진중인 지하화 사업에 복층터널 도입 검토를 통해 경제성, 시공성, 환경성이 우수한 터널 설계 대안으로 가능함
분기구간 단면 설계 가이드라인(안)	가이드라인(안)	복층터널 분기구간에 대한 안정성 평가 기법 및 가이드라인(안) 개발	복층터널 분기구간의 효율적이고 경제적인 설계가 가능함	기존에 없었던 대심도 복층터널 분기구간의 안정성 평가기술을 확보	복층터널 분기구간의 계획 및 설계시 분기구간 터널의 안정성을 확보하기 위한 적정 이격거리와 분기각도별 안정성 저하 영향을 파악하는 자료로 활용 복층터널 분기구간 설계시 본 가이드라인을 활용
복층터널 중간슬래브 설계기준(안) 및 조립지침(안)	기준/지침	국내에도 자체적인 복층터널 중간슬래브 설계 및 조립지침 보유	자체적인 중간슬래브 설계기술 확보로 국내 자본의 해외 유출 방지 및 기술 수출 가능	한계상태설계법과 기존 강도설계법 및 허용응력설계법을 복합한 설계 기술 확보 프리캐스트 슬래브를 이용한 중간슬래브 조립지침 확보	국내 복층터널 중간슬래브 설계에 활용 국내 복층터널 중간슬래브 조립에 활용
복층터널 내진설계 가이드라인(안) 복층터널 동적시험 절차서(안)	가이드라인(안)	복층터널 중간슬래브에 대한 내진설계 가이드라인(안) 보유	중간슬래브 내진설계 기술을 보유하여 국내 기술로 자립 및 수출 가능	실내시험 및 내진해석을 통하여 국내 실정에 맞는 기술력 확보	국내 복층터널 중간슬래브 내진설계시 가이드라인(안)으로 사용 국내 복층터널 설계 시 동적시험 절차서(안)으로 활용가능
슬래브 동하중 전파에 따른 구조물 응답특성분석	보고서	기술자립	유지보수 비용 절감	기술자립을 통하여 국내 독자적인 기술 보유	중간슬래브의 진동응답 사전 파악 및 설계 활용
도심권역 특성에 맞는 맞춤형 복층터널 지보/보강 설계기술		기술선도	기술선도	불안정한 설계 및 시공을 방지하여 대단면 복층터널의 안정성 확보, 굴착과 지하수 영향에 따른 지반거동 평가기술 확보	대규모 지하공동 보강에 활용 횡갱 굴착시 강지보재 지지 효과로 활용 가능 강지보재를 적용하는 경우 숏크리트 만으로 보강하는 경우에 비해 약 13% 공사비 절감 효과

단위성과명	성과물 형태	기술수준	경제성	성과의 우수성	활용실적 및 방안
대단면 복층터널의 근접시공 안전도 평가기술	가이드 라인(안)	복층터널의 토피고/ 직경비와 지하수 조건에 따른 안전도 평가 시스템 개발	복층터널 구축 시 인접구조물 안정성 확보 가능 뿐만 아니라 기술자립을 달성	기존 연구에서는 볼 수 없었던 도심지에서 터널 굴착과 지하수 영향에 따른 지반거동 평가기술을 확보	복층터널의 계획 및 설계 시 굴착과 지하수 영향에 따른 지반거동 평가기술 적용 도심지 건설되는 복층터널에 대하여 영향범위를 미리 파악하고, 인접구조물에 미치는 손상 파악 가능
입체표지판, 조명시스템 (복층터널 내부시설 운전자 친화 설계 기술개발 및 가상 프로젝트)	시제품 (재료)	(입체표지판) 시설한계고에 국한되지 않는 입체표지판 문자높이 기존 대비 20%이상 확대가능 (시인성 향상) (조명시스템) 광덕트형 조명시스템 (집광효율 향상(30%), 장거리 빛의 수평 전달 (목표40m)) 빛의 수평전달 도광부 직경 최소화 (300mm이하)	기존 수직형 내부조명식 교통표지판과 동등한 경제성 확보가 가능 태양광 추적방식 조명시 시스템 개발로 기존 고정식 태양광보다는 약 30% 정도 고가이나 집광량이 200%이상 확보되어 효율성을 고려한경제성은 약 35% 절감가능	입체표지판 : 복층터널 천장방향으로 부착되어 일정거리에서 수직표지판과 동일한 정보를 제공하는 측면에서 기술적인 차별성을 갖음. 조명시스템 : 기존 고정식 태양광 시스템과는 달리 태양의 고도를 추적하여 집광효율을 최적화 하는 차원에서 기술적인 차별성이 있음.	횡성군 공공하수처리시설 내 친환경 조명시스템 적용 완료 서울시 도봉구 관내 기존 표지판의 외부조명식 시스템 적용 완료 복층터널 실규모 터널 (건기연 : 경기도 연천소재)에 적용완료
타일대체용 친환경 불연도료 개발	재료	중금속 함유량 0.05 무게% (500mg/kg) 이하 1000℃에서 유독가스 무배출 대심도 복층터널에 적용가능	타일대체용 불연도료 개발로 타일에 비해 초기시공비가 적게 들고 유지보수 용이	불연도료로서 화재에 안전하고 친환경도료 로서 고립된 공간에서 작업자의 안전을 확보 초기비용이 저렴하고 유지보수가 용이하여 경제적인 내장재임	경부고속도로 지하화 사업 및 하저터널 사업에 활용

단위성과명	성과물 형태	기술수준	경제성	성과의 우수성	활용실적 및 방안
가상프로젝트 및 시뮬레이션	시제품	가상설계, 가상시뮬레이션을 통하여 설계기술 검증 → 관련 기술자립	복층터널 설계 가능 → 경제적 성과 창출을 위한 기반조성	기존 복층터널 관련 연구성과와 함께 복층터널 구간에서의 분기계획을 설계성과로 반영	현재 추진중인 지하화사업에 복층터널 도입을 통해 용지편입, 민원, 교통문제 등에 대한 해결방안으로 활용이 가능함
복층터널의 다목적 활용을 위한 조합 설계기준 및 유지관리 기술개발	정책 · 제도 공법 · 기법	복층터널의 다목적 활용 기술 확보 터널의 기능 전환 시 유지관리 기술 확보	복층터널 시공을 통한 공간 활용 능력 및 시공예산 저감	복층터널의 다기능적 활용 기술 확보	복층터널의 다용도 운용 시 터널 안정성 확보 및 유지관리 방안 제시
역류방지장치	시제품	다기능 복층터널의 복원력 유지를 위한 장치 개발	다목적 터널의 유지관리비용 감소, 수리열화 방지로 안정성 및 사용성 확보	터널의 기능유지를 위한 제품의 특허 취득 및 시제품 제작	활용방안 : 다기능 터널의 배수시스템에 적용 및 설치
수로겸용 복층터널의 수방기법 및 통수능 기술 검토	공법· 기법	- 다목적 복층터널 설계기술 확보 통수능 검토기술 확보	다목적 복층터널 가능성 제고를 통한 건설예산의 중복투자 방지	침수 방지를 위한 배수 및 차폐 시스템 구현으로 다목적 터널의 활용도 제고 도심 다목적 수로 터널 설계 가이드라인 제시	터널 내 침수 발생이 우려되는 경우 유입수를 일시적으로 차단하여 터널의 안정성 향상 도시 우수관 구조에 따른 유입 량 추정 알고리즘 제안 및 터널 통수능 확보 방안 제시

■ 2세부 : 효율적인 복층터널 시공기술 개발

단위성과명	성과물 형태	기술수준	경제성	성과의 우수성	활용실적 및 방안
복층터널 최적화 시공을 위한 보강, 굴착기술 및 Mock-up Testbed 구조체	공법·기법 장비·장치	분기부 전용 세그먼트 적용 가능, 소형 그라우트 믹서 기술 확보, 복층터널 구축 기술 확보(Testbed 구축)	강재 + 콘크리트 사용에 따른 경제성 확보, 시공성 향상에 따른 경제성 확보	지하 분기구간 전용 세그먼트 및 굴착 기술과 보강 장비 확보로 경제성 및 시공성 확보	복층 혹은 일반터널의 분기구간 시공 시 세그먼트 제거, 굴착, 보강 공법에 활용 가능
커팅해드 어태치먼트	공법·기법	커팅헤드 어테치먼트 장비 설계 및 제작 기술 확보	장비구매비 (커팅헤드어태치먼트) : 외산장비 (약1.2억원), 개발 장비 (약0.8억원)	저소음 모듈 및 암반대응 형 스마트 파쇄모드 좌, 우 굴진 성능을 향상	유사 작업현장 시험 완료 복층터널 확폭 및 분기부 제작에 활용 설비 보완 후 지뢰제거 작업등에 활용.
고성능 복합(브라켓 일체형) 라이닝 세그먼트 개발	공법·기법	슬래브 설치를 위한 브라켓의 형식, 설치 기술 확보	브라켓 일체형 세그먼트 라이닝 제작으로 브라켓 공정에서 16.8% 비용 절감	슬라브를 위한 브라켓 설치에 별도의 추가공정이 필요치 않으므로, 공기단축, 경제성 향상이 가능	향후 복층터널 계획 및 시공시 기술 활용가능
변단면 확폭 분기부 보강기술	공법·기법	분기부 보강 기술 검증 완료	최적 설계법 확보로 경제성 확보	확폭 분기부에 대한 국내 보강기술 향상	대단면 터널 연결부 대편평율 구간 보강 설계시 활용
취약특수부 (분기부 필라/유출입부) 보강기술	공법·기법, 재료·자재	기술자립	국내 및 국외 터널 확폭부, 분기부 시장 확대	지반에 횡방향 뿐만 아니라 종방향, 연직방향으로 구속력을 작용시켜 지반의 강도를 증가시킴	경부고속도로 지하화 사업 적용 검토
시공속도 향성형 중간슬래브 가설장비 제작	공법·기법	연속화 작업이 가능한 전용가설장비 제작	시공성 향상에 따른 경제성 우수	기존 기술 대비 약 50%이상 시공속도 향상 가능하며 안전성에도 우수	연천 SOC T/B 구축시 전용가설장비를 활용하여 성능을 확인하였으며, 향후 기존 크레인 가설이 어려운 현장에 적용

단위성과명	성과물 형태	기술수준	경제성	성과의 우수성	활용실적 및 방안
브라켓 시공을 위한 라이닝 천공장비의 개발・제작	공법·기법	PC브라켓 및 연속적 천공 장비	PC 및 강재브라켓 공장제작으로 경제성, 시공성이 향상됨	품질이 우수하며 시공속도가 빨라 슬래브의 설치가 빨라져 전체 공정의 공기 단축	현장적용성(시공효율성)을 추가적으로 검토할 계획이며, 기존 구조물 풍도슬래브 설치시 PC 브라켓을 적용 및 반영할 계획이다.
1일20MPa발현 그라우트 배합기술 및 재료	재료·자재	1일 21MPa	1톤당 473,240원	(1)초기 고강도 발현가능 (2)안정성 향상가능 (3)공기단축 가능	터널 분기구 건설시 조기 고강도그라우트 설계반영 추진 중 붕괴가능성 높은 지중터널 건설시 보강용 그라우트 설계반영 추진 중
내부형상 모니터링 및 관리 기술 개발	공법·기법	내부형상 모니터링 오차율 10% 이내	-	내부형상 모니터링 기술 전무	·기술이전 실시 (2017.05) ·기술실시명 : 비접촉 레이저 스캔 및 광학 이미지 기법을 이용한 교량구조물 변형모니터링 기술 ·기술이전기업 : ㈜토건테크
복층터널 생애 전주기 유지관리 및 안정성 분석 프로그램	공법·기법	설계, 시공 및 운영 단계 유지관리 및 안정성 평가 기술 확보	유지관리 자동화로 인한 연간 터널 유지관리 비용 20% 절감	설계, 시공 및 운영 단계 가이드라인을 반영한 유지관리 프로그램 개발	(방안) 터널관리주체 / 복층터널 유지관리 사업 발주 시
복층터널 연결 수직구 접속 개구부 및 브라켓 시공기술 개발	공법·기법, 재료·자재	2층/1일 평균 20% 이상 공사비 절감 수직구-횡갱 접속부 1~2일	현장타설 공법대비 시공 속도 20%이상 향상	공사비 10% 절감 공사기간 20% 단축	(실적) 신월 빗물저류배수시설 부분 현장적용 (2018.05) (방안) 수도권 도심지 도로 및 철도 건설현장 확대적용(서부간선도로, 신안산선,GTX)
복층터널용 수직구 히팅슬립폼 장치 개발 및 수직구 운송용 승강장치, 프리캐스트 Slab, 계단 조립식 시공기술	공법·기법, 재료·자재	히팅슬립폼 (4m/day) 및 SLAB, 계단 (3m/day)	현장타설 공법 대비 시공속도 30%이상 향상 및 공기 20% 이상 절감	공사비 10% 절감 공사기간 20% 단축	(실적)김포도시철도 5공구 수직구 #25번 현장 적용 (실적) 신월 빗물저류배수시설 현장적용 (방안) 수도권 도심지 도로 및 철도 건설현장 확대적용(서부간선도로, 신안산선,GTX)

■ 3세부 : 복층터널 환기 및 화재안전 설계 기술 개발

단위성과명	성과물 형태	기술수준	경제성	성과의 우수성	활용실적 및 방안
네트워크형 복층터널 환기시설 설계 및 운영기준	기준/지침	• 네트워크 복층터널 환기해석 기술 확보 및 최적 환기설계 기법 확보	• 최적 환기설계를 통한 시공 및 운영비 절감 • 기존 지침 대비 복층터널 제트팬 요구 대수 15% 감소 (가상 복층 터널 5km 적용 시)	• 네트워크 및 복층 특성을 고려한 환기설계 기법의 적용 및 각종 보정계수 최신화 등을 통한 환기설계 기준 제시 및 다양한 환기방식에 대한 모범설계사례 제시	• 설계 및 시공사 홍보를 통한 환기설계 및 해석 기술의 적용 및 고문 활동 • 모범환기설계사례 제시를 통한 네트워크형 복층터널 환기설계 최적화 방안 제시
네트워크형 환기 설계 및 해석을 위한 SW	SW 기타	• 네트워크형 환기해석기술 확보 • 국외 예측능력 대비 90% 이상 정확도 확보	• 자체개발기술 적용 설계로 설계비용 절감 • 환기시스템과 다 설계 방지 및 최적화를 통한 운전비 30% 이상절감	• 기존은 일자형 도로터널에 설계 및 해석에서 네트워크 도로터널의 환기설계 및 환기해석 기술 확보(기술자립) • 기존의 텍스트 및 수계산에 의존한 방식에서 GUI에 의한 데이터 입력 및 변수 설정으로 편리성 확보	• 대심도 복층터널 환기시스템 성능을 예측하고 적정한 설계사양을 공학적으로 해석할 수 있는 소프트웨어를 통하여 설계단계에서 해석검증을 실시 구현 • 개발된 SW 기술을 이용 터널환기 제어방법 기술이전 실시 • 개발된 환기설계 및 해석 소프트웨어를 이용 유사 네트워크 지하공간인 철도터널, 방음도로터널, 광산등에 적용하여 제어 시스템 구축
복층터널에 통과할 것으로 예상되는 소형차에 의해서 배출되는 오염물질별 실제 배출량 DB구축	공법/기법	• 정속주행시 오염물질 배출량이 현저히 감소함을 확인하고 환기량 및 환기기 용량 산정 기준 제시	• 환기기 용량 감소를 통한 시공 용 25%절감	• 소요 환기량 적정성 확보 • 최신 경사.속도보정계수 반영	• 도로터널 환기시스템 설계기준(서울시)에 반영 예정
복층터널의 환기기 운전제어를 위한 제어알고리즘 개발	시스템	• 환기기 운전 동력비 절감을 위한 운전단계 최적화 방안 • 농도값 및 농도변화량을 반영하는 퍼지제어 • 제어로직 평가를 위한 동적시뮬레이션 프로그램 개발	• 운전단계 및 제어알고리즘 최적화를 통한 환기기 운전 동력 25%이상 감소	• 운전단계 최적화를 위한 운전단계 산정 기법 개발 • 농도 및 농도변동값을 반영하는 제어로직	• 조합 환기System에 대한 자동제어로직 서부간선지하차도 실시설계 반영 • 횡류환기방식에 대한 운전단계 및 자동제어로직 부산 만덕- 센텀 터널 실시설계 반영

단위성과명	성과물 형태	기술수준	경제성	성과의 우수성	활용실적 및 방안
복층터널 환기성능 개선을 위한 대배기구 포트 최적화 기술	SW	• 환기성능 110% (성능향상)	• 유지관리비 80~90% (10%이상 유지관리비 절감)	• 대배기구 포트 설치를 최적화를 통한 환기효율을 향상으로 환기탑 설치 수량 저감 가능	• 만덕~센텀 고속도로(센텀터널) 및 신림~봉천 공구(신림봉천터널) 설계에 적용
복층터널 오염물질 외부 배출 영향 최소화 기술	기타	• 오염물질 저감율 10% ▲ (성능향상)	• 설치공사비 80~90% (10%이상 공사비 절감)	• 환기탑 오염물질 배출 저감기술 적용하여 오염물질 영향범위를 기존 환기탑 대비 15% 저감	• 추후 도심지 복층터널 설계 시 환기탑 설치에 따른 주변 민원 최소화를 위해 활용될 것으로 예상
복층터널 화재대응 기술 개발	기타 장비/장치	• 조건별 복층터널 차량화재 특성 분석 및 DB 구축 • 보급성 및 경제성을 확보하고 화재에 직접적인 소화 활동이 가능한 원격 자동소화 시스템 구축 • 화재연동형 대배기구 개발을 통한 시스템 단순화 성공	• 터널 방재부문 과설계 방지 • 원격 자동소화 설비 적용시 물분부 설비 대비 30% 절감 • 화재연동형 대배기구 시스템 단순화를 통한 결제성 확보	• 소단면 터널화재 특성 반영 • 장대화/대심도화/교통정체 등의 현대 터널환경 추세에 직접적인 소방인력 투입없이 신속하게 화재대응 가능 • 용융형 휴지디바이스 적용으로 터널내 온도에 기계적으로 반응하여 시스템 구동을 단순화	• 경제적이고 합리적인 터널 방재설계 가능 • 장대화/대심도화/도심지 도로 교통정체 등의 현대 터널환경 추세에 즉각적인 화재대응을 위한 필수 기술로 확대 • 사회 전반적으로 설비의 자동화 및 무인화되고 있는 현시점에 원격 자동소화 시스템은 터널, 공장, 물류창고, 선박 등 다양한 분야에 활용가능
터널 구조물 내화성능 향상 기술/기준 개발	공법·기법 정책·제도	• 표준화재(ISO)에 노출된 건축물용 중간 슬래브 2시간 내화성능 기술 보유 • 터널 RABT 조건에 적합한 중간 슬래브 내화기술 확보 • 내화설계 기술/기준 마련으로 유럽, 일본 대비 70% 기술 수준 도달)	• 내화기술 국산화로 인한 기술료 약 23% 절감 예상 -기술료(내화기술) : 외산기술(약 97억원), 개발 기술(약 75억원)(제물포터널 가상 적용시, 7.5km) • 터널 구조물 내화설계 제도 운영에 따른 관련 시장 생성/활성화 가능	• 일반 건축물에 적용하는 내화기술과는 달리 터널 고화재강도에 대응하는 내화기술로서, 터널 구조물의 화재 붕괴를 미연에 방지하는 기술임	• (실적) KICT(연천) SOC실증연구센터 복층터널 테스트베드 적용('20년 6월) • (실적) 대심도 내화설계지침(안), 터널 구조물 보수/보강 지침(안) 제시

단위성과명	성과물 형태	기술수준	경제성	성과의 우수성	활용실적 및 방안
복층터널용 화재연기 확산지연장치 설치 및 시공지침	장비/장치 기타	• 분기부 및 합류부에 대한 최적 설치 위치 선정 기법 제시 • 복층터널에 설치 가능한 종방향 기류제어를 통한 화재연기 확산지연 기술 장치 개발 및 설치 • 화재연기 확산속도 50% 저감	• 스프링탄성에너지를 이용해 신속한 개방이 이뤄짐 • 설치방법이 용이해 시공시간단축과 시공비용 감소 효과가 기대 • 기존 방재설비와 도 연계가 가능해 추가 시공에 다른 추가설치 설비에 비해 비용 절감	• 분기부 및 접속부가 존재하는 네트워크형 복층 터널에 화재에 의한 초기 피해 방지가 가능하도록 화재연기 확산지연 장치에 대한 시공 및 운영 가이드라인 제정 • 스프링 탄성을 이용해 무동력 방식으로써 화재발생시 신속한 작동으로 화재발생한 경우 즉시 대처가 가능, 화재발생시 불연성 소재의 커튼이 작동해 터널을 전부 차단하지 않아 터널 이용자 탈출이 가능	• 지하차도 (Box형 단면) 실시설계 (경쟁설계)에 연기확산차단 및 대피성능 향상을 위한 제연보조 설비로 적용 할 계획
복층터널 (자동화 소화설비)	장비/장치 기타	• 복층 터널용 자동화 소화설비 기술 및 운영시스템 확보 - 분사 거리 최대 20~25m - 조준 정확도 80% 이상 구현가능	• 국외 기술 대비 옥내소화전 사용 및 제품 최적화를 통한 기반설비 절감 가능 • 국내 물분무 설비 대비 약 30% 경제적인 절감구현	• 복층터널 및 경제적인 초기화재 진압을 위한 옥내소화전을 활용한 화재진압 또는 지연장치 개발 · 기존 옥내소화전 용수배관을 통한 경제성 구현 · 설비규모 최소화를 통한 해당 기술의 국산화 구현	• 서울시 관내 구룡터널 (분당방향) 옥내소화전을 활용한 자동화 소화설비 적용 완료 • 복층터널 실규모 터널 (건기연 : 경기도 연천소재)에 적용 완료
대심도 복층터널 화재시나리오 및 운영방안 수립	기타	• 복층터널 특성에 맞는 안전관리 기술 및 화재시나리오 확보	• 복층터널 특성을 고려한 화재시나리오 및 운영방안 적용으로 비용 절감 가능	• 대심도 복층터널 화재 시나리오 기반 위험관리체계 확보	• 대심보 복층터널 및 소형차 전용터널의 위험성 평가 및 방재시설 운영시 활용
복층터널 이용객의 신속대피를 위한 스마트 피난경보 앱 개발	SW	• 무선 블루투스 통신 방식을 이용한 즉각적 위치기반 피난유도가능	• 스마트폰에 내장된 무선통신을 이용한 피난유도시스템 활용	• 스마트폰에 내장된 무선통신기술을 활용한 신속피난대피 유도 가능	• 복층터널을 비롯한 도로 및 철도터널 피난유도시스템에 활용
복층터널 영상유고감지 시스템	SW 장비/장치	• 복층터널 특성 반영 영상유고감지시스템	• 모든 구현방식 지원 신뢰성 및 경제성(20~60%)	• 복층터널 환경 특성 반영 • 모든 구현방식 지원 • 유효감지거리구현 (100m, 2.5m 설치 높이기준)	• (복층터널)영상유고감지시스템 S/W • 건설, 정보통신 SI사 등 대상 프로그램 판매 및 기술이전을 통한 실용화 추진

라. 양적성과목표 및 달성도(세부별 작성 후 연구단 취합)

구 분		목표	달성	달성도(%)	비고
국내외 논문게재 (SCI)		94 (11)	105 (19)	100	
특허	출원	34	50	100	
	등록	15	34	100	
기타	학술발표	35	97	100	
	보고서	18	23	100	
	시제품, 시작품	33	38	100	
	소프트웨어	13	16	100	
	설계지침	4	4	100	
	사업화	1	0	0	기술실시 계약 완료('19.10) 후 사업화 추진 중
	운영매뉴얼	3	4	100	
	제작도면	2	3	100	
	시나리오	1	1	100	
	Test Bed 적용	6	9	100	
	기술이전	0	10	추가	
	산학연간기술지원	0	7	추가	
	현장적용	2	11	100	
	홍보	0	53	추가	
	인력양성	0	6	추가	

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

가. 연구성과 활용방안

■ 1세부 : 복층터널 최적화 설계기술 개발

▶ 제1요소기술 : 복층터널 최적화 단면 설계기술

◦ 대심도 복층터널의 계획수립에 있어서, 분기구간의 대단면 안정성이 확보되는 기술 확립으로 도로기능을 극대화 할 수 있는 계획 수립이 가능함.
◦ 복층터널 분기구간의 계획 및 설계 시 본 연구결과에서 도출된 분기구간 안정성 평가기법을 이용하여 분기구간 터널의 안정성을 확보하기 위한 적정 이격 거리(필라폭)와 분기각도별 안정성 저하 영향을 파악하는 자료로 활용할 수 있음.
◦ 복층터널 분기구간 안정성 평가 기술을 통해 분기구간의 효율적인 설계를 진행할 수 있어 설계공정의 단축에 상당한 효과가 있을 것으로 기대됨.
◦ 본 연구에서 작성된 복층터널 분기구간 단면설계(안) 가이드라인을 이용하여 복층터널 분기구간 설계 시 본 가이드라인을 활용함.
◦ 복층터널 단면설계 시 고려하여야 하는 구성요소 및 구성요소별 검토결과를 참고함으로써 실무 활용에 도움
◦ 복층터널 분기구간에 대한 표준단면을 제시하여 분기구간 단면 설계 시 실무 활용에 도움
◦ 복층터널 풍도슬래브 거치용 프리캐스트 브라켓을 개발하여 시공 시 브라켓 구조물 시공 및 유지관리 향상 가능

▶ 제2요소기술 : 복층터널 구조체 설계 및 성능평가 기술

◦ 복층터널 중간슬래브의 최적 단면을 설계할 수 있는 기술을 개발하여 슬래브간의 접합부를 연결하는 방안으로 활용 가능
◦ 복층터널 라이닝 강결부의 내하력을 평가하여 안정성을 확보하고 프리캐스트 중간 슬래브의 조립 지침으로 활용 가능
◦ 복층터널 중간슬래브 구조와 터널 콘크리트 라이닝간의 내진해석기술을 개발하여 지진 시 보다 안전한 구조물을 만들 수 있음
◦ 슬래브의 진동에 영향을 미치는 요인과 수치적으로 모델링 하는 방법을 제시하여 설계 및 해석 시 활용.
◦ 터널 내 차량주행 시 복층슬래브에서 발생하는 진동특성을 구조체의 특성, 경계조건, 차량의 특성 및 노면조도 등을 고려하여 해석하고 분석하는 과정을 구체적으로 제시함으로서 설계에 반영할 수 있는 원천 기술 확보
◦ 구조체, 경계조건, 노면조도, 주행속도 등의 변화에 따른 동적해석 결과의 인자

별 분석결과를 설계 시 기초자료로 활용.

▸ **제3요소기술 : 복층터널 근접시공 안정성 확보를 위한 설계기술**

◦ 복층터널 근접시공 안정성 확보를 위한 설계기술 개발은 도심지 최적 지보/보강 기술 선정, 대단면 굴착에 따른 지반거동 예측, 지반-기초-구조물 상호작용을 고려한 구조물 손상평가 등 복층터널 현장적용을 위한 계획 및 설계 단계에서 유용하게 사용될 계획임.

◦ 도심권역 가상설계와 현장사례의 DB를 구축함으로써 향후 사업화에 따른 설계, 시공 기술로 활용가능하며 복층터널 안정성에 대한 신뢰성 있는 자료로서 후속연구에도 활용이 기대됨.

◦ 대규모 지하공동 보강 시 보강효과 상승 및 공사비 절감 효과로 활용성 기대

◦ 횡 갱 굴착 시 강지보재 지지 효과로 터널 접속부와 같은 취약구간의 안정성 향상으로 안전성 향상에 기여

◦ 복층터널 건설 시 근접시공에 따른 인근구조물의 영향과 손상평가에 대한 가이드라인 작성과 향후 건설공사 설계기준 반영에 활용이 가능함.

◦ 본 연구결과를 토대로 복층터널의 계획 및 설계 시 굴착과 지하수 영향에 따른 지반거동 평가기술을 적용할 수 있다. 또한 도심지에 건설되는 복층터널에 대하여 영향범위를 미리 파악하고, 인접구조물에 미치는 손상을 파악할 수 있어 시민들에 대한 민원처리 비용 절감 효과가 기대된다. 도심지에 건설되는 대심도 터널에 대한 기초연구로써 향후 진행되는 연구에 활용성이 높을 것으로 기대된다.

▸ **제4요소기술 : 복층터널 내부시설 운전자 친화 설계 기술개발 및 가상 프로젝트**

◦ 내부조명식 입체표지판 : 본 기술의 개발은 완료 하였으나, 실용화를 위해서는 제도적인 개선이 요구되기 때문에 최종 성과물에 대해서는 실규모 복층터널 Test Bed에 적용응 바탕으로 향후 설계반영을 통한 실용화를 추진할 예정임.

◦ 외부조명식 도로표지판 : 도봉구청에 Test Bed 시범설치를 하여 향후 설계반영을 통한 실용화를 추진할 예정임. (수요처 : 국도관리사무소 및 특광역시 등)

◦ 친환경 조명시스템 : 5차년도 시범설치를 바탕으로 향후 당사의 지하구조물(지하차도, 공동구 등)에 설계 반영하여 실용화를 추진할 예정임.

◦ 타일대체용의 품질을 만족하고 화재안전성을 필요로 하는 터널사업뿐 만 아니라 기타 지하공간에도 적합한 도료 개발로 향후 현장에 실시 설계 추진

■ 2세부 : 효율적인 복층터널 시공기술 개발

▸ 제1요소기술 : 복층터널 최적화 시공을 위한 굴착·보강, 구조체 구축 및 유지관리 기술 개발과 Test-bed

◦ 지하공간에서 지상공간 혹은 지하공간의 다른 인프라와 연결되는 네트워크형 터널(복층터널)의 구축은 지하 인프라가 지속적으로 증가하고 있어 가까운 시일에 필요한 기술로 부상할 것으로 판단됨

◦ 제거형 세그먼트는 지하도로의 비상주차공간 등 확폭이 필요한 구간에 우선 적용 가능할 것으로 판단됨

◦ 커팅헤드 어테치먼트 장비는 지하공간에서 비상대피 공간 등 확폭이 필요한 구간에서 공간 확보를 위해 활용될 수 있을 것으로 판단됨

◦ 협소공간 대응형 그라우트 재료 및 장비는 지하 구조물 구축 시 우선적으로 활용 될 수 있으며, 건축물(아파트 등)의 지하주차장 등 협소한 공간에서도 활용할 수 있음

◦ 필라부 보강 기술은 병렬터널의 근접구간, 지하차도 등의 분합류 구간에 우선 적용 가능하며, 향후 지하도로의 분합류 구간 구축 시 활용 될 수 있음

◦ 복층터널 전주기 안정성 확보 시스템은 현재 운영되고 있는 터널, 향후 구축될 터널 등 많은 인프라 구조물에 적용 하여 사용 가능한 기술로 홍보 등을 통한 적용처 확보 추진 예정

▸ 제2요소기술 : 도심 대심도 수직구의 친환경 시공기술 개발

◦ 도시지역의 과밀화에 따른 지하도로, 지하철도 등 지하 교통인프라 관련 사업이 많이 계획되어 있음

◦ 수직구의 경우 공사의 마지막 단계로 진행되는 경우가 많으며, 촉박한 공사기간과 상부 주거지, 도로 등의 불편함 해소를 위해 급속으로 시공되어야 하는 경우가 자주 발생함

◦ 복층터널이 건설되는 경우 적용 가능하며, 현장 시험시공에서와 같은 다양한 지하 인프라 건설 현장의 수직구 공사에 활용 가능함

◦ 지속적 홍보와 발주처 협의를 통한 사업화 실현을 추진할 예정

▸ 제3요소기술 : 도심 대단면 복층터널 고함수비 굴착버력 친환경 급속처리기술 개발

◦ 도시지역의 지하 인프라 공사 시 굴착버력의 사토 공간을 충분하게 확보하기 어렵고, 도시 미관 상 오래 방치하기 어려움

◦ 도시지역의 기계화 시공이 이루어 지는 현장의 경우 갱내 및 갱외의 급속 처리를 통한 사토장 최소화와 환경문제를 해결 할 수 있는 기술로 도시지역 지하 인프라 현장에 적극 활용할 계획

■ 3세부 : 복층터널 환기 및 화재안전 설계 기술 개발

▶ 제1요소기술 : 복층터널 네트워크형 환기 설계 및 해석 기술

◦ 네트워크형 복층터널 환기설계 인자 및 모범환기설계사례 제시를 통한 효율적인 환기설계 및 운영에 활용

◦ 터널 내 오염물질 배출량 예측 및 환기효율성 증대를 통한 지역주민 불안요소 제거

◦ 개발된 환기설계 및 해석 소프트웨어를 이용하여 유사 현장인 대심도 지하공간인 광산, 복합철도터널, 방음도로터널 등에서 환기분석 및 환기제어에 시스템 구축에 활용 추진 중임

◦ 최근 반도체 분야에서 반도체 공정상 제품의 품질에 저해하는 미세먼지 제거를 위하여 네트워크 형태의 덕트 및 공조시스템에 투자를 하고 있는 실정 임 따라서 개발된 소프트웨어를 보완하면 반도체 제조에서 공기질 향상을 위하여 네트워크 환기 덕트 분석에 활용을 추진하고자 함

◦ 도로터널의 환기를 위한 소요환기량 산정 및 환기시스템 설계를 위한 기술기준으로 활용

◦ 조합환기방식의 터널에서 환기기 운전동력을 절감하기 위한 운전단계 선정 기술로 활용

◦ 조합환기방식을 적용한 도로터널의 환기기 운전을 위한 운전제어로직으로 활용

◦ 상기의 개발성과를 도로터널의 환기시스템의 설계 엔지니어에 대한 교육을 통해 도로터널 환기시스템 설계에 반영

◦ 도로터널 환기기 운전단계 최적화 및 환기기 자동제어 알고리즘을 시공중인 터널에 적용하여 유지관리비용을 절감하기 위한 기술로 활용

▶ 제2요소기술 : 복층터널 오염물질 확산 예측 및 외부 배출 방지 기술

◦ 대도심에 건설되는 터널의 급배기 포트 개구율을 최적화 할 수 있는 프로그램을 개발/활용함으로써 환기구간 증가에 따른 환기 효율 저하를 방지하여 환기탑 수량을 감소시킬 수 있음.

◦ 환기탑 오염물질 영향범위를 저감하여 도심지 복층터널 건설 단계에서 환기탑 설치에 따른 민원 최소화 가능

◦ 산업발전에 따라 사회 전반적으로 설비의 자동화 및 무인화가 확대되고 있는 현시점에 원격 자동소화 시스템은 터널, 공장, 물류창고, 선박 등 다양한 분야에 활용가능

◦ 특히, 대심도 및 장대화 되어 가고 있는 터널 추세에 맞춰 비상시 신속한 대응이 가능한 원격 자동소화 시스템 적용은 터널 안전확보에 필수

◦ 일반 터널과 달리 복층터널의 특수성(층을 구분하는 중간슬래브가 적용)을 반

영한 내화설계 기술로서 추후, 복층터널 뿐만 아니라 대심도, 네트워크 터널과 같은 특수 터널에도 파생 활용 가능한 선도 기술

▶ **제3요소기술 : 복층터널 화재확산 제어 및 내화 성능 향상 기술**

◦ 터널 내화설계 지침 제정에 근거로서 활용(기준/제도 제정에 따른 관련 시장의 생성/활성)
◦ 지하차도(Box형 단면) 및 횡류식 터널 실시설계(경쟁설계)에 연기확산차단 및 대피성능 향상을 위한 제연보조 설비로 적용 할 계획
◦ 도로터널 2~4등급 방재설비가 보완 및 많은 통행량에 따른 위험도가 높은 곳에 적용하여 초기 화재진압 및 터널 관리(CCTV)로 활용 가능
◦ 복층터널을 비롯한 소형차 전용터널 등의 위험성 평가 및 방재시설 운영시 활용 가능

▶ **제4요소기술 : 복층터널 화재안전 평가 및 관리시스템 구축**

◦ 복층터널을 비롯하여 일반 도로 및 철도터널의 피난유도시스템에 활용 가능
◦ 복층터널에 대한 적용성 이외에도, 국내외 일반터널, 교량 및 철도(화물기지등) 유지관리 기관 대상으로 기술 실용화 추진중
◦ 한국전기안전공사(KESCO) 혁신사업, 딥러닝기반 열화상 영상유고분석시스템 구축 컨설팅 용역 성과 및 이에따른 연관 사업 추진중

나. 기대효과

(1) 경제적 파급효과

■ 1세부 : 복층터널 최적화 설계기술 개발

▶ 제1요소기술 : 복층터널 최적화 단면 설계기술

◦ 설계정립을 통하여 대심도 지하도로(네트워크 타입)로 복층터널 건설이 가능하도록 설계기준이 정립되므로 건설기술 확보시 해외 선진기술의 답습이 아닌 세계 선도도 가능할 것이라 예상됨
◦ IC/JCT 연결로 분기구간의 효율적인 굴착 및 보강기술 개발을 통하여 경제적인 설계가 가능함.
◦ 콘크리트 라이닝 설치 전에 시공되는 분기구간 굴착 및 지보보강의 안정성 확보로 운영 중 구조물 유지관리 비용과 시간을 절약할 수 있을 것으로 기대됨.

▶ 제2요소기술 : 복층터널 구조체 설계 및 성능평가 기술

◦ 세계 최고수준의 복층터널 중간슬래브 설계기술 확보로 개발도상국을 중심으로 개발기술의 해외 수출 가능.
◦ 복층터널 중간슬래브 시스템에서는 교량, 도로포장, 철도궤도 이외의 새로운 형식의 콘크리트 슬래브에 대한 설계기술을 개발함으로써 기존의 관련 기술분야의 발전을 도모할 뿐 만 아니라 새로운 기술분야를 개척하는 기반 마련.
◦ 복층터널의 중간슬래브 구조체를 프리캐스트 슬래브를 사용하여 조립 시공함으로써 친환경적인 시공이 가능하며 사전제작된 슬래브를 이용하기 때문에 현장타설 중간슬래브 대비 시공 시간을 대폭 줄일 수 있으며 이에 따른 시공비용 감소효과가 큼.
◦ 복층터널의 중간슬래브 구조의 설계 및 시공 기술 자립화로 관련 기술 수입에 따른 국내 자본의 해외 유출 방지.
◦ 지진시를 대비하여 충분한 내진안정성을 확보할 수 있는 기술을 개발하여 국민안전에 기여하며 사고로 인한 막대한 경제, 산업적 비용지출을 사전에 예방가능.
◦ 복층터널의 동적해석 및 내진설계 원천기술 확보로 국내 자본의 해외 유출 방지 및 해외컨설팅을 통한 수출력 확보.
◦ 복층터널의 중간슬래브 구조체를 프리캐스트 슬래브를 사용하여 조립 시공함으로써 친환경적인 시공이 가능하며 사전제작된 슬래브를 이용하기 때문에 현장타설

중간슬래브 대비 시공 시간을 대폭 줄일 수 있으며 이에 따른 시공비용 감소효과가 큼.

◦ 복층터널의 중간슬래브 구조의 설계 및 시공 기술 자립화로 관련 기술 수입에 따른 국내 자본의 해외 유출 방지.

◦ 터널 구조체를 통과하는 교통하중에 의한 진동에 따른 구조체의 응답특성을 분석하여 최적단면설계에 활용하여 시공성 및 경제성을 확보가 기대됨.

▶ **제3요소기술 : 복층터널 근접시공 안정성 확보를 위한 설계기술**

◦ 도심지권 특성에 맞는 복층터널 지보/보강 기술 개발로 인해 복층터널의 단·장기적인 안정성을 확보함으로써 지보효과 부족으로 인한 불필요한 보강을 억제할 수 있어 보다 경제적인 설계가 가능하고 사업비 절감 효과가 기대됨.

◦ 시공 중인 터널과 그에 따른 인접구조물과 사회기반시설이 손상되게 되면 막대한 경제적 손실뿐만 아니라 인명피해도 초래할 수 있음. 본 연구결과를 활용하여 도심지와 복층터널 특성에 적합한 지보/보강 기술을 개발함과 동시에 복층터널 계획 및 설계 시 굴착과 지하수 영향에 따른 영향범위를 미리 파악하고, 인접구조물에 미치는 손상을 미리 파악하여 토지 및 건물에 대한 보상비, 민원처리 비용을 절감할 수 있음. 또한 공기지연과 유지보수 기간으로 인한 경제적 손실도 절감할 수 있음.

▶ **제4요소기술 : 복층터널 내부시설 운전자 친화설계 기술개발 및 가상 프로젝트**

◦ 복층터널용 입체표지판을 개발함으로서 대심도 복층터널에 대한 입체표지판 개발을 통하여 운전자의 효율적인 교통정보 제공 및 화재시 효율적인 대피방안을 제공함으로서 교통사고 및 터널화재로 인한 인적 피해 최소화

◦ 시설한계가 낮은 복층터널 및 지하도로에 적용 낮 동안에 발생되는 화이트홀 및 블랙홀 현상을 제어하기 위하여 인공조명을 설치하였고 운전자의 암순응 시간을 단축시켜 터널 내 안전성과 가시성을 확보하기 위하여 사용되는 소모전력 최소화와 유지관리 비용을 절약할 수 있음

◦ 장대터널에 주로 이용되는 타일을 대체하여 친환경 불연도료를 마감함으로서 시공이 편리하고, 유지관리비가 저렴하며 공사 기간을 단축할 수 있기에 경제적 파급효과가 기대됨.

◦ 기존의 터널들과는 달리 공간 활용도가 우수한 복층터널은 향후 교통 지정체 현상으로 발생되는 경제적 손실을 감소시키는데 크게 기여할 것으로 판단됨. 또한 복층터널 원천기술력 보유를 통하여 세계 건설 시장 진출에서도 유리한 위치를 선점할 수 있는 기회가 될 것으로 예상됨.

▸ 제5요소기술 : 복층터널 다목적 활용 설계 및 운영 기술

◦ 복층터널의 효율적인 활용으로 도시지역의 홍수방지 기능과 교통문제를 동시에 해결함으로써 안전예산과 건설예산의 중복투자를 방지하는 효과가 기대됨.
◦ 다기능 복층터널 복원력 증진기술 개발로 인하여 구조물 유지관리 시간과 비용 절감이 기대됨.
◦ 국민의 삶의 질 향상.
- 적극적인 침수대책으로 국민의 불안 해소 및 삶의 질 향상을 기대할 수 있으며, 국가 경제 발전 및 성장 촉진에 기여하고, 재해에 강한 국토 기반 인프라 조성으로 국민에게 쾌적한 삶을 제공

■ 2세부 : 효율적인 복층터널 시공기술 개발

◦ 복층터널의 슬래브 설치를 위한 브라켓 및 라이닝 기술 연구를 통하여, 과다 설계가 배제된 터널 라이닝 최적 형식의 브라켓 설계 및 제작 방법, 공기 단축을 위한 향상된 설치방법, 슬래브 설치로 인한 라이닝 거동 파악과 효과적인 보강방법 확보함으로서 좀 더 경제적인 복층터널의 건설이 가능해지게 함

▸ 제1요소기술 : 복층터널 최적화 시공을 위한 굴착 · 보강, 구조체 구축 및 유지관리 기술 개발과 Test-bed

◦ 유럽, 싱가폴, 일본 등에서는 TBM 장비를 이용한 터널시공시 본선터널 내부에 피난연락갱, 접속부, 확폭부 등을 설치하기 위하여 강재 세그먼트를 사용하고 있으며, 이러한 강재세그먼트 및 특수세그먼트는 제작 단가가 매우 높음. 따라서 본 연구를 통한 특수 콘크리트 세그먼트 개발을 통하여 기존 강재세그먼트 대비 높은 경제성을 확보가 가능.
◦ 건설기계 어태치먼트 대체 주력제품 육성과 개발제품의 경제적, 환경적 장점과 효과를 적극 인식시키고, 해외 선진메이커 제품에 비해 가격대비 품질 경쟁력의 우위를 부각시킴으로써 수출 기반조성.
◦ 굴삭기/건설기계 시장에서 암반파쇄/광산기계 시장으로 확대 진출하여 수출 산업 증대에 기여
◦ 기존의 공간을 많이 차지하는 그라우팅 공법을 대체함으로서, 직접 공사비를 감소시키고, 넓어진 공간으로 안전사고 등을 예방할 수 있어 터널 현장의 작업환경이 개선될 것으로 전망되며, 개발된 제품의 해외시장 진출으로 수출 증대에 기여
◦ 복층터널 Test-bed를 구축하여 연구단 개발 기술들의 성능 시현 및 보완 가

능.

◦ 실제형 복층터널 Test-bed를 구축하여 지하도로 실험 인프라를 제공함으로써, 향후 국내에서 복층터널 관련 연구 진행시 최적 실험 환경을 제공할 수 있음

◦ 복층터널 Test-bed 는 현재까지 국내에서 구축된 바가 없는 환경으로써, 국내외 동일 내용의 공사 시공시 이를 이용하여 활용성을 높일 수 있을 것으로 기대됨

◦ 대편평율/변단면 확폭 및 보강 연구를 통해 국내에서 설계 및 시공이 전무한 대심도 복층터널의 변단면 확폭 및 보강기술을 통해 향후 추진될 사업의 설계 공정의 단축에 상당한 효과가 있을 것으로 전망됨.

◦ 또한 향후 건설 가능성이 높은 도심지 대심도 터널에 적용 가능하며, 건설비용 최적화 및 환경·사회적 문제점 해소에 크게 기여할 수 있음.

◦ 대심도 복층터널의 건설에 있어 국내 독자적인 시공기술 개발로 국내외 잠재적 복층터널 시장참여에 있어 시공성 및 기술료 발생 등의 시공비용 측면에 기술적 우위를 점할 수 있음

◦ 신뢰성 있는 하중전달 시스템으로서 브라켓 및 중간슬래브 시공법 개발로 중간슬래브의 단면을 최적화할 수 있으며 이를 토대로 공사비 · 공기절감 등의 유형 · 무형의 경제적 가치를 확보 가능

◦ 터널 라이닝에 적합한 브라켓의 형상, 재료, 크기를 제시함으로서 기존의 연구부재로 인한 과대 설계 및 적용 가능성을 배제하여 공사비 절감이 가능해지며, 브라켓의 현장타설, PC, 세그먼트 결합 등 설치 방법에 따른 각종 비용과 시공시간 등을 비교 분석함으로써 터널 현장에 적합한 최적 설계 방향을 제시.

◦ 내오플랜 등의 신소재 탄성받침 적용성을 검토하여 기능성 향상과 비용 절감 가능성을 확인 및 관련 시장으로 확대진출 가능

◦ 슬래브 설치로 인한 라이닝의 거동과 보강 기술을 연구함으로서 기존 연구 미비로 인한 과대 설계 및 적용 가능성을 배제하고 효과적인 공법 제시 및 공사기간 단축을 도모

◦ 근접터널에 따른 필라부 보강공법 개발시 일반 병렬터널 대비 굴착폭 감소로 수용 토지 면적이 감소되며, 국외 개발도상국 및 신흥 교통밀집 도시에 대한 설계 제안 및 기술이전 등의 효과기대

◦ 대심도 복층터널의 시공 중 및 공용 중 안전관리를 위한 내부 슬라브 처짐 및 변형률 모니터링 기법의 개발 및 사업화

◦ 대심도 복층터널 내부형상 모니터링 기법의 선진기술 선점으로 미래 원천기술 확보

▶ **제2요소기술 : 도심 대심도 수직구의 친환경 시공기술 개발**

◦ 국내의 계획되어 있는 도심 대심도 수직구 내부 층간 PC 슬래브 설치용 브래킷 현장타설 철근콘크리트 구조(두께 약 280~350mm)로 검토되어 있으며, 이를 공장에서 제작된 신뢰성 있는 PC 브래킷 또는 철물 브래킷 구조를 변경 시 두께를 20%이상절감하고 제작 설치 단가를 낮출 수 있을 뿐만 아니라, 기존의 RC 브래킷 공법은 거푸집 설치, 해체 반복작업등의 비용이 소요되지 않아 경제적일 뿐만 아니라, 공기단축 및 타 공정과의 간섭이 발생하지 않아서 효과적인 시공성 가치를 확보할 수 있음. 또한 내부 PC 슬래브 설치를 편리하게 설치하도록 고안함으로써 전체적인 복층터널용 수직구 건설비용을 절감 할 수 있음.

<수직구 구조물 시공방식에 따른 경제성 비교>

	현장타설 RC 브래킷 방식		강제 & PC 브래킷 조립방식	
수직구 내경 Ø8m	제원	t_s = 280~350mm f_{ck} = 24MPa	제원	t_s = 200~250mm f_{ck} = 40MPa (철물 브래킷)
	공사비	150,000원/m	공사비	120,000원/m

◦ 수직구 슬래브 설치용 브래킷을 적용한 공기단축 효과와 더불어 수직구 고속 슬립폼 장치 시공시 수평 개구부 터널에 접속된 편리한 시공 구조로 개선하여 경제성을 확보할 수 있음. 본 연구 개발로 인해 공사비 · 공기절감 등의 유형 · 무형의 경제적 가치를 확보 가능

◦ 국내의 계획되어 있는 도심 대심도 수직구 벽체와 내부 층간 슬래브는 현장타설 철근콘크리트 구조(두께 약 250~300mm)로 검토되어 있으나, 이를 공장에서 제작된 신뢰성 있는 PC 슬래브 또는 계단 구조 변경시 두께를 20%이상의 제작단가를 낮출 수 있을 뿐만 아니라, 기존의 RC공법과 달리 거푸집 및 동바리 등의 비용이 소요되지 않아 경제적일 뿐만 아니라, 공기단축 및 타 공정과의 간섭이 발생하지 않아 서 효과적인 시공성 가치를 확보할 수 있음. 또한 내부 슬래브의 자중을 최소화 하고 편리하게 설치하도록 고안함으로써 전체적인 복층터널용 수직구 건설비용을 절감 할 수 있음.

<수직구 구조물 시공방식에 따른 경제성 비교>

	현장타설 RC 슬래브 방식		히팅 슬립폼 & PC 슬래브 방식	
수직구 규격 ∅8m, H=46m	제원	t_s = 250~300mm f_{ck} = 24MPa	제원	t_s = 200~250mm f_{ck} = 40MPa
	공사비	800만원/1m	공사비	640만원/1m

◦ 수직구 히팅 슬립폼 시스템을 적용한 공기단축 효과와 더불어 내부 층간 슬래브와 브라켓 및 계단을 편리한 시공 구조로 개선하여 경제성을 확보할 수 있음. 본 연구 개발로 인해 공사비 · 공기절감 등의 유형 · 무형의 경제적 가치를 확보 가능

▶ 제3요소기술 : 도심 대단면 복층터널 고함수비 굴착버력 친환경 급속처리기술 개발

◦ 복층터널의 건설에 있어 도심지 대단면 굴착에 따른 고함수비 굴착버력의 친환경 급속 처리 기술 개발로 국내외 잠재적 복층터널 시장참여에 있어 시공성 및 시공비용 측면에 기술적 우위를 점할 수 있음
◦ 또한, 갱내에서 굴착버력을 처리할 경우 작업장내 야적장이 불필요하거나 소규모로 계획 할 수 있기 때문에 작업장 부지를 최소화 할 수 있는 여건을 마련할 수 있음

■ 3세부 : 복층터널 환기 및 화재안전 설계 기술 개발

▶ 제1요소기술 : 복층터널 네트워크형 환기 설계 및 해석 기술

◦ 네트워크형 복층터널 환기 설계 인자 제시 및 보정계수, 기준배출량 최신화를 통하여 초기 환기 설계에서의 최적화를 통한 시공비 절감 효과를 기대할 수 있음.
◦ 복층터널 네트워크 터널의 쾌적한 환경 확보를 위한 최적 환기설계기법의 개발로 인하여, 운영시 최소한의 환기운영비의 산출이 가능하게 되며, 이는 곧 터널의 운영비 절감에 상당한 효과를 기대할 수 있음.
◦ 환기 방식별 모범설계사례를 제시함으로써 환기설계 시 터널 특성에 맞는 최적 환기 방식 채택에 기여.

◦ 복층터널 네트워크 터널의 쾌적한 환경 확보를 위한 최적 환기설계기법의 개발로 인하여, 운영시 최소한의 환기운영비의 산출이 가능하게 되며, 이는 곧 터널의 운영비 절감에 상당한 효과를 기대할 수 있음.
◦ 최적의 수직구 설계 및 송풍기의 활용설계는 초기 시공성 향상을 통한 초기 개발투자비의 절감이 가능할 것으로 기대.
◦ 국내 원천 기술의 확보로 인하여, 국외의 선행된 설계시스템의 도입에 대한 기술료 및 시공료의 비용절감이 가능해짐.
◦ 복층터널의 환기 시스템의 향상으로 불필요한 간접비용 발생 차단
◦ 지하상가에서의 원활한 환기 시스템으로 인한 상권의 쾌적함으로 시민의 지하상가를 이용함으로 경제 활성화에 기여함.
◦ 복층터널 네트워크형 환기 소프트웨어 기술로 유사 지하공간분야(지하상가, 광산, 주차장, 철도터널 등)의 다양한 형태로 유연하게 적용됨으로써 관련분야의 후광 효과로 인하여 경제 활성화에 기여함
◦ 소프트웨어 국산화 개발로 수입대체 및 신산업 창출 및 활성화에 기여함
◦ 환경 산업에 환기시스템에 대한 소프트웨어를 활용 함으로써 다양한 설비기준에 효율적인 이용 마련

▶ **제2요소기술 : 복층터널 오염물질 확산 예측 및 외부 배출 방지 기술**

◦ 소형차 전용의 도로터널의 적정 소요환기량 산정으로 환기 시스템 과다설계 방지를 통한 경제성 실현
◦ 환기기 운전단계 및 운전제어를 최적화함으로서 환기기 운전동력비 절감
◦ 복층터널 오염물질 외부배출 영향 최소화 기술 개발을 통하여 현재 정체되어있는 오염물질 저감 시스템 시장의 활성화 및 기술개발의 독려가 가능하며, 친환경 환기탑 건설을 통해 환기탑 설치 지역의 분쟁 및 갈등의 해소가 가능함.

▶ **제3요소기술 : 복층터널 화재확산 제어 및 내화 성능 향상 기술**

◦ 본 연구의 기술개발을 통해 국내외적으로 추진되고 있는 장대도로터널 및 대심도 지하도로에 적용가능한 신규 방재시설(원격제어살수설비)을 개발하여 터널방재에 대한 기술력을 확보하였으며, 경제적인 측면에서도 기존 터널의 방재시설인 물분무 설비 대비 약 35%이상 절감이 가능하므로 기존 기술대비 초기화재진압성능/경제성을 높이는 시설로써 기존/신규 터널 적용 확대를 통한 경제적 파급효과 증대
◦ 터널방재분야의 선진국 의존도를 개선하고 독자적 연구개발/설계기술 능력을

확립하여 국제적 건설시장의 기술경쟁환경에 대응하고 첨단 방재엔지니어링 설계분야의 제품개발에 활용

◦ 원격 자동 소화설비 및 운영시스템 분야의 연구, 설계, 시공, 평가등 종합적인 개발능력을 갖는 전문 엔지니어의 양성을 통한 전문인력확보

◦ 기술자립과 국내 현장적용을 통해 완성도를 끌어 올린 후 국외 시장에 참여

◦ 도로터널 외 공동구나 지하차도 등과 같은 다양한 터널에도 적용될 수 있는 유연성이 예상됨. 특히 문헌을 통한 일부 유사기술의 국외 적용시도 사례에 근거해 본다면, 터널현장 적용실험을 통해 국외 수출도 가능할 것으로 기대됨.

◦ 터널 구조물 내화성능 향상 기술은 현재까지 국내에서는 미개척 신규 시장이며, 본 과제를 통하여 개발된 내화기술을 토대로 국내에서 관련 산업의 성장을 기대할 수 있음.

◦ 화재 손상 구조체 평가 및 보수보강 기술은 대구 지하철 사고시 일본 기술진의 평가 및 진단 사례에서 보듯이 국내에서는 본격적인 기술개발 및 관련 산업분야가 본격적으로 형성되지 못한 분야이므로, 손상도 평가기술 및 보수보강 매뉴얼 개발을 통하여 신수종 사업분야 개척 및 관련 기술의 대외의존도를 낮추어 외화 유출을 최소화 할 것으로 기대됨

◦ 화재연기 확산지연 장치 개발로 종방향 기류제어를 통해 복층터널 및 횡류식 적용 터널에 설치시 토목 시공비 절감이 가능함

▶ 제4요소기술 : 복층터널 화재안전 평가 및 관리시스템 구축

◦ 대심도 복층터널 안전성 확보 운영기술 개발에 따른 위험요인 제거 및 사고발생율 감소에 따른 피해복구 비용과 안전관리·운영비용 절감

◦ 향상된 안전관리 방안 모델 확보로 인한 안전투자 비용 증가 기대

◦ 안전관리 개선으로 인한 국내 방재산업 활성화

◦ 국내외 스마트 폰 보급률의 증가를 고려할 경우, 별도의 추가 안전장비(모듈)의 장착이 필요없이 실용화가 가능한 경제적인 방안이며, 복층터널 뿐만 아니라 초고층 빌딩 혹은 대규모 지하공간의 상업용 시설(극장, 놀이시설, 경기장, 콘서트장 등)의 대규모 인명이 밀집된 폐쇄공간에서 비상상황이 발생할 경우 안전한 피난을 유도할 수 있는 피난기술에 적용이 가능할 것으로 예상됨.

◦ 터널영상유고 감지시스템 및 CCTV시스템 구축에서 발생할 수 있는 중복투자 문제를 해결할 수 있도록 범용 CCTV 카메라를 영상유고감지기로 활용하므로 특정제품에만 호환되는 CCTV가 납품되는 것을 방지함.

◦ 영상유고분석 알고리즘을 ASCI IC화 가능하도록 코드 최적화 개발을 하므로 향후 터널영상유고감지기를 보편화 할 수 있어 경제적인 파급효과는 크다고 할

수 있음

◦ 아울러 영상유고 영상 + 유고데이터의 통합 DB프로그램을 향후 구축되는 터널 관리센터에도 적용함으로써 추가적인 예산 절감 효과가 기대된다. 유고영상 DB시스템을 매번 개별적으로 구축할 필요 없이 통합DB프로그램을 적용하면 DB서버 비용을 제외한 DB 프로그램 개발비용을 줄일 수 있기 때문임

◦ 예산절감 효과와 함께 센터가 모두 동일한 통합DB프로그램을 사용함에 따라 센터와 센터간의 연계에 있어서도 호환성을 확보, 통합터널관리시스템 구현 가능해질 것으로 판단됨

◦ 범용 CCTV 시스템기반 영상분석 서버를 활용한 영상유고감지시스템은 국도·고속국도에서 운용중이나 신뢰성 저하, 국외 FLIR Tafficon 등 영상유고전용감지기 방식이 있으나 고가로 범용적 적용이 어려우며, 또한 직접적 복층터널에 적용은 불가

◦ 복층터널 환경 특성 적응적 객체(화재 등) 영상분석 알고리즘 구현과 임베디드화 개발로 영상유고전용감지기 상용화, 국외제품 대비 20~60%원가 절감 기대됨.

<table>
<tr><th rowspan="2">구분</th><th colspan="2">기존방식</th><th colspan="2">복층터널 영상유고감지시스템</th></tr>
<tr><th>범용CCTV기반S/W방식</th><th>영상유고전용감지기</th><th>범용CCTV기반S/W방식</th><th>영상유고전용감지기</th></tr>
<tr><td>설치비</td><td>400만/채널</td><td>600만/채널</td><td>300만/채널</td><td>250만/채널</td></tr>
<tr><td>운영비</td><td>운영비용 높음</td><td>운영비 낮음</td><td colspan="2">대동소이</td></tr>
<tr><td rowspan="2">인식율</td><td rowspan="2">인식율▽, 오탐율▲</td><td rowspan="2">안정성 우수</td><td>인식율▲, 오탐율▽</td><td>안정성 우수</td></tr>
<tr><td colspan="2">(공통) 감지기 설치 높이 3m이내 / 감지거리 100m 구현 / 연기, 화염에 특화, 우수한 감지 능력확보</td></tr>
</table>

(2) 기술적 파급효과

■ 1세부 : 복층터널 최적화 설계기술 개발

▸ 제1요소기술 : 복층터널 최적화 단면 설계기술

◦ 설계정립을 통하여 대심도 지하도로(네트워크 타입)로 복층터널 건설이 가능하도록 설계기준이 정립되므로 복층터널 시공의 근거를 제공
◦ 유입과 유출시 최적단면제시로 지하내에서의 네트워크 구성의 근거를 설정되어 자유로운 계획이 가능
◦ 초대형 터널단면에서의 분기구간 굴착·보강 기술 확보로 독자적인 국내 대심도 복층터널 설계·시공을 가능케 함과 동시에 해외진출의 기초적인 발판이 될 것으로 기대됨.

▸ 제2요소기술 : 복층터널 구조체 설계 및 성능평가 기술

◦ 세계 최고수준의 복층터널 중간슬래브 설계기술 확보로 개발도상국을 중심으로 개발기술의 해외 수출 가능.
◦ 복층터널 중간슬래브 시스템에서는 교량, 도로포장, 철도궤도 이외의 새로운 형식의 콘크리트 슬래브에 대한 설계기술을 개발함으로써 기존의 관련 기술분야의 발전을 도모할 뿐 만 아니라 새로운 기술분야를 개척하는 기반 마련.
◦ 복층터널 중간슬래브에 동하중 전파에 따라 터널 구조물이 보이는 응답특성을 분석하고 이를 해석 및 설계에 반영할 수 있는 기술 확보로 개발도상국을 중심으로 개발기술의 해외 수출 가능.
◦ 복층터널 중간슬래브 구조와 콘크리트 라이닝간의 동적 상호 연계해석 및 실내시험을 통한 내진설계기술을 개발함으로써 기존의 관련 기술분야의 발전을 도모할 뿐 만 아니라 새로운 기술분야를 개척하는 기반 마련.
◦ 터널 구조체를 통과하는 교통하중에 의한 진동에 따른 구조체의 응답특성분석을 통해 다양한 용도의 터널 구조체의 단면설계시 필요한 평가방법을 제시할 수 있다.

▸ 제3요소기술 : 복층터널 근접시공 안정성 확보를 위한 설계기술

◦ 도심지 지반조건과 지하수 조건에 적합한 복층터널 최적 지보/보강 설계기술 개발을 통하여 최적화된 설계, 시공품질 확보가 가능함. 불안정한 설계 및 시공을 방지하여 대단면 복층터널의 안정성도 확보할 수 있음. 또한 국제 수준의

지보/보강 설계기술 개발의 기반을 마련함.

◦ 본 연구를 통해 굴착과 지하수 영향에 따른 지반거동 평가기술을 확보함. 이는 도심지 복층터널 설계 시 인접구조물에 미치는 영향을 파악하는 중요한 기술일 뿐만 아니라 다른 굴착관련 연구에도 중요한 기초연구로 확산 효과를 기대함.

▶ **제4요소기술 : 복층터널 내부시설 운전자 친화설계 기술개발 및 가상 프로젝트**

◦ 대심도 복층터널 구조적인 특성상 낮은 형고로 인하여 운전자가 표지판을 인식할 수 있는 거리 및 상황판단 시간이 짧아 교통사고를 유발할 확률이 높아지기 때문에 복층터널용 입체표지판을 개발함으로서 운전자에게 충분한 상황판단 시간을 제공함으로서 선진 교통표지판 개발을 위한 원천기술 확보 가능

◦ 기존 도로터널의 경우, 운전자가 안전하게 대피할 수 있는 피난대피통로의 위치를 제공할 수 있는 인식이 부족하여 터널교통사고로 인한 화재발생시 효율적인 대피가 어렵지만 피난연결통로 입구부에 효율적인 입체표지방안을 제시하여 터널화재 발생시 인명피해를 최소화 할 수 있는 표지기술 확보 가능

◦ 대심도 복층터널 구조적인 특성상 낮은 형고로 인하여 운전자의 불안감이 증대되기 때문에 이러한 좁은 터널의 개방감을 줄 수 있는 조명방안을 제시함으로서 장대터널 통행으로 인한 운전자의 심리적인 안전감 제공 가능

◦ 자연채광시스템은 태양광을 이용하여 빛이 부족한 공간에 빛을 방사함으로써 인공조명 대비 시각적 인지력 및 시환경의 쾌적성을 향상시켜 심리적인 안정감을 제공하는 등 지속가능한 건축을 위한 태양에너지 활용시스템의 하나로 도입 및 확대가 크게 기대됨

◦ 타일대체용의 품질을 만족하고 화재안전성을 필요로 하는 터널사업뿐 만 아니라 기타 지하공간에도 적합한 도료 개발로 향후 관련 프로젝트 활성화에 기여함.

◦ 국내 복층터널 원천적 기술력을 연구를 통하여 보유함으로서 국내 토목건설 기술력 향상에 크게 도움이 될 것으로 판단됨

▶ **제5요소기술 : 복층터널 다목적 활용 설계 및 운영 기술**

◦ 복층터널의 다목적 활용은 도심지 치수능력 증진과 교통편익을 동시에 추구가능한 건설기술의 개발이 기대됨.

◦ 국내에는 지하공간의 다목적 활용에 관한 종합적인 설계, 시공 시뮬레이션이 구축되어 있지 않으므로, 본 연구를 바탕으로 개발 가능한 기술을 통해 다목적 복층터널에 대한 범용 시뮬레이션 프로그램으로 확장개발을 기대할 수 있음.

◦ 국내 기술력 향상.

- 현재 도시홍수방어의 국내 기술력은 선진국 대비 70% 기술수준이며, 수로겸용 복층터널을 통한 도시홍수방어 기술은 연구개발의 초기단계라 할 수 있음. 이에 본 연구를 통해 도시홍수방어 기술력이 향상됨은 물론 기술 선점을 통한 기술이전이 가능할 것임.

■ 2세부 : 효율적인 복층터널 시공기술 개발

◦ 기존의 연구가 부족한 복층터널의 브라켓 설치 및 라이닝 보강 최적 기술을 확보하여 복층 터널의 설계 및 시공에 경제성과 안전성을 증가시키고, 대구경 장대 터널의 상부 환기 덕트나 Shield TBM 터널 하부 공간 활용에 사용되는 슬래브 구조에도 최적 기술을 적용할 수 있을 것으로 예상됨

▸ 제1요소기술 : 복층터널 최적화 시공을 위한 굴착 · 보강, 구조체 구축 및 유지관리 기술 개발과 Test-bed

◦ 본 연구개발을 통하여 강재세그먼트 및 해외(일본 오바야시건설 등)에서 적용되고 있는 특수 세그먼트 보다 시공성 및 경제성이 우수한 세그먼트 개발기술 확보 가능.

◦ 암반대응 최적 굴착 기술 및 저소음 굴착기술을 구현하여 선진 업체와 기술격차 최소화하고, 건설기계 부품산업의 고품질, 고부가가치 기술의 확보

◦ 그라우팅 재료와 소형화 장비를 동시에 개발하므로서 세계적인 추세에 부응하고, 관련 고부가가치 기술을 확보

◦ 국내 최초의 복층터널 Test-bed를 구축하여 터널방재분야 연구개발 능력 향상에 기여함으로써 국제 건설시장 기술 경쟁력 확보

◦ 현장 적용성 평가를 통하여 개발된 기술들을 터널 시공 및 방재 엔지니어링 분야 제품 개발에 활용 가능.

◦ 국내의 대단면 확폭 터널 보강에 대한 연구를 기반으로 쉴드터널의 변단면 확폭부 굴착공법 및 보강공법의 점진적인 연구가 지속될 수 있을 것으로 전망되고, 본 연구 결과 도출된 대심도 대단면 복층터널 확폭부 보강 기술을 일반 터널 확폭구간에 에 적용이 가능할 것으로 전망됨.

◦ 향후 추진이 유망할 것으로 기대되고 있는 GTX, U-SMARTWAY, 초장대 해저터널사업 등의 쉴드 TBM 공법에 본 기술이 활용될 것으로 전망됨

◦ 중간슬래브와 브라켓 구조체 시공기술 개발로 복층터널의 안정성과 내부공간의 다목적성을 고려한 시공이 가능하고, 선진기술의 국산화와 신기술 개발의 조기달성을 통한 기술 선점으로 국내 수도권에서 계획하는 도심지 대심도 터널계획 및 설계에 적극적인 반영과 해외 개발도상국 및 신흥 교통밀집 도시에 계획중인 복층터널 시공에 참여하는 국내업계에 경쟁력있는 슬래브 시공기술의 이전

등의 효과가 기대됨

◦ 구조분야와 터널분야의 복합적인 특성으로 연구가 미비했던 라이닝의 슬래브 설치 및 보강 기술을 확보함으로써 향후 복층터널의 기술적 접근성을 향상 시킬 것으로 기대됨

◦ 세계적으로 지하공간 활용은 증가하고 있고, 이 연구를 통해서 확보될 라이닝 슬래브 설치 및 보강 기술은 지하공간 분할 활용을 위한 기초 기술로 적용 될 수 있어 향후 지하공간 활용의 주요 기술로 적용될 수 있을 것으로 기대됨

◦ 보강공법 개발에 따라 지하공간에서 원활한 지하도로 네트워크 구성이 가능해 짐지고, 관리주체별로 산재되어져 있는 근접시공에 대한 가드라인이 제시되어 서울시 및 광역시에서 계획하는 도심지 대심도 터널계획 및 설계에 적극적인 반영이 기대됨

◦ 대심도 복층터널의 실시간 내부형상 관리를 통해 대심도 복층터널의 안전성을 확보하고 그에 안전신뢰성을 높일 수 있으며, 시설물 유지관리 기업으로의 기술 확산을 통해 터널 내부형상 관리 사업 실용화도 가능

◦ BIM과 FEM융합을 통해 필요한 물량산출 뿐만 아니라 동시에 복층터널의 안정성을 분석할 수 있는 융합 기술 확보와 대단면 복층터널의 생애전주기 정보화 및 안정성을 통합 관리 시스템 구축

▶ 제2요소기술 : 도심 대심도 수직구의 친환경 시공기술 개발

◦ 수직구 환기 및 층간 슬래브와 브라켓 구조체 시공기술 개발로 복층터널의 수직구 안정성과 내부 복합공간이 효과적인 시공이 가능

◦ 국내 수도권 및 도심지 연결 대심도 터널계획 및 설계에 적극적인 반영이 기대됨.

◦ 신공법 개발로 국내 및 국외 도시건설 계획에 지중화 기술선점

◦ 해외 개발도상국 및 신흥 교통밀집 도시에 계획중인 복층터널 및 철도, 전력구, 지하 수로건설 시공에 참여하는 국내외에 수직구 시공기술의 보급 및 이전 등의 효과가 기대됨

▶ 제3요소기술 : 도심 대단면 복층터널 고함수비 굴착버력 친환경 급속처리기술 개발

◦ 기존의 굴착버력 처리는 작업장내에서 별도의 처리를 하는 상황으로 대단면으로 굴착하는 복층터널의 경우 굴착버력 양이 과다하게 발생되어 작업장내에서 처리하는 방법으로는 한계가 있는 실정임

◦ 따라서, 갱내에서 굴착버력의 함수비를 저감시켜 작업장 내에서 별도의 처리없

이 바로 처리할 수 있는 기술, 갱내에서 처리가 어려운 고함수비 굴착버력은 소규모 야적장에서 급속으로 처리할 수 있는 기술이 필요하며, 현재 국내에서는 이와 관련된 연구는 전무한 실정으로 본 연구에서 확보된 원천 기술들을 바탕으로 해외 건설 수주에 선도적인 역할 수행을 할 수 있을 것으로 기대됨

■ 3세부 : 복층터널 환기 및 화재안전 설계기술 개발

▶ 제1요소기술 : 복층터널 네트워크형 환기 설계 및 해석 기술

◦ 본 연구를 통해 개발된 환기설계 지침은 전세계적으로 원천기술을 확보하는 것이며, 이에 따라서 국내 시장뿐만 아니라 국외의 터널건설시장에서 기술적 우위를 선점할 수 있을 것으로 전망됨.
◦ 자국 내 원천기술을 바탕으로 순수 국내기술을 적용한 터널환기설계를 구축할 수 있을 뿐만 아니라, 향 후 새롭게 시작되는 연구 및 시공에 있어서 선행연구로서 중요한 역할을 담당할 것으로 전망됨.
◦ 복층터널사례를 가지고 있는 국외의 경우 기술의 우위를 점하기 위한 자국 내 기술보호로 인하여 연구된 기술들의 누출을 기피하고 있는바, 국내의 원천기술 확보를 통하여 꾸준한 국내 순수기술의 개발 및 연구의 진행에 많은 기여를 할 것으로 기대됨.
◦ 환기 소프트웨어로 설계 가이드를 제공 하여 터널관련 환기 설계 기술 향상
◦ 국내 실정에 적합한 환기 시스템 설계 기본 소프트웨어로 활용
◦ 국내 자체적인 기술개발로 환기 시스템의 선진화 기대

▶ 제2요소기술 : 복층터널 오염물질 확산 예측 및 외부 배출 방지 기술

◦ 현재 도로터널 환기시스템에 대한 과다용량산정의 원인이 되는 오염물질별 기준배출량을 현실화함으로서 도로터널의 환기량 산정에 대한 신뢰성을 확보하여 환기기 용량 과다설계 방지
◦ 특히, 도심지에 건설수요가 많은 소형차전용 지하도로은 장대화 될 수밖에 없으며, 이로 인해 환기시스템 용량이 대용량이 될 수밖에 없는 실정으로 운전단계최적화 방안을 적용함으로 운전동력을 절감효과가 클 것으로 기대됨.
◦ 도로터널의 환기제어는 피드백 제어를 기본으로 하나, 운전단계가 많을 수 밖에 없는 조합환기방식의 터널내 농도에 따른 환기기 운전단계를 결정하는 제어로직으로 활용가능
◦ 복층터널 오염물질 외부배출 영향 최소화 기술 개발을 통하여 오염물질 저감

시스템 시장이 활성화되면, 현재 해외 기술에 의존하던 시장에 국내 생산 라인으로 확대되고 나아가 국산화하는데 기여할 것으로 예상됨.

▶ 제3요소기술 : 복층터널 화재확산 제어 및 내화 성능 향상 기술

◦ 기존의 방재기술대비 기술적/효율적/경제적이 우수한 자동화 소화설비 개발로 장대 도로터널 및 지하도로에 선진화된 방재기술 원천기술 확보
◦ 국내 획일적인 사양적 지침제시와 외국의 연구결과/경험에 크게 의존하고 있는 관련 기술력으로는 지하도로와 같은 복잡한 구조의 터널의 안전을 효과적으로 확보하기에 한계가 존재하는바, 본 연구개발을 통해 도로터널 및 지하도로의 화재진압 안전 분야 설계 및 엔지니어링 기술 발전 기여
◦ 향후 다수의 건설이 예상되는 국내 지하도로에 대한 화재진압기술과 방재설비 설계안을 정립하여 인위재해에 대한 국가적 대응능력을 향상시키고 국민의 안전하고 쾌적한 삶 실현을 위한 건설기술을 구축
◦ 터널화재현상에 대한 실험데이터를 축적하고 실규모 실험을 통해 기초연구자료를 제시하여 관련 연구 분야의 활성화에 기여
◦ 도로터널 및 지하도로 소방분야에서 수치·축소모형·실규모 성능평가실험으로 체계적인 개발을 통해 선도적인 화재진압 기술 확립
◦ 원격 자동 소화설비를 이용하여 다양한 지하공간에서의 대형화재 발생시 화재확산을 효율적으로 차단할 수 있는 소방방재 시스템으로 도약
◦ 기존의 터널방재 지침을 보완 발전하여 선진 방재기술 도약 제고
◦ 경제적인 터널 화재연기 확산지연 장치 개발로 인한 방재시설 연동으로 주변 소방 관제 장비들의 개선
◦ 향후, Wireless Network 및 Mobile network등의 첨단 기술과의 융합 가능성 타진
◦ 현재 낙후된 터널 내 안전시설이 첨단 기술과의 융합을 통해 궁극적으로 편리하고 안전하며 쾌적한 터널 시설로의 변경
◦ 터널 뿐만이 아니라 타 분야에 적용 가능하므로 타 분야에 기 적용되어 있는 제연 시설과의 연계된 새로운 제연 설비 기술의 향상 기대
◦ 기존의 방재기술대비 기술적/효율적/경제적이 우수한 자동화 소화설비 개발로 장대 도로터널 및 지하도로에 선진화된 방재기술 원천기술 확보
◦ 국내 획일적인 사양적 지침제시와 외국의 연구결과/경험에 크게 의존하고 있는 관련 기술력으로는 지하도로와 같은 복잡한 구조의 터널의 안전을 효과적으로 확보하기에 한계가 존재하는바, 본 연구개발을 통해 도로터널 및 지하도로의

화재진압 안전 분야 설계 및 엔지니어링 기술 발전을 도모함.

◦ 향후 다수의 건설이 예상되는 국내 지하도로에 대한 화재진압기술과 방재설비 설계안을 정립하여 인위재해에 대한 국가적 대응능력을 향상시키고 국민의 안전하고 쾌적한 삶 실현을 위한 건설기술을 구축함.

◦ 터널화재현상에 대한 실험데이터를 축적하고 실규모 실험을 통해 기초연구자료를 제시함으로써 관련 연구 분야의 활성화에 기여할 수 있을 것으로 판단됨.

◦ 도로터널 및 지하도로 소방분야에서 수치·축소모형·실규모 성능평가실험으로 체계적인 개발을 통해 선도적인 화재진압 기술을 확립함.

◦ 자동화 소화설비를 이용하여 다양한 지하공간에서의 대형화재 발생시 화재연기를 효율적으로 차단할 수 있는 소방방재 시스템으로 도약 가능

◦ 기존의 터널방재 지침을 보완 발전하여 선진 방재기술 도약 제고

◦ 국내 터널 화재에 대한 화재안전기술은 터널 라이닝 내화기술 등 일부 국한된 부분에 한정되어 개발되었으며, 터널 구조체 내화피복기술 및 폭렬방지기술 개발은 매우 미비한 상황에서, 차량 유류화재 등 화재강도가 높은 상황에 대한 터널 구조체 내화기술 개발은 향후 플랜트 등 유류 화재 및 폭발 화재에 대한 2차 기술 파급을 유도할 수 있으며, 관련 기술의 국제적 경쟁력 확보에도 기여할 것임

◦ 화재 피해 구조물 손상도 평가기술은 현재 국내에서 체계적인 평가 절차 수립도 이루어지지 않은 상황에서, 관련 기술 개발을 통한 터널 구조물 뿐만 아니라 건축물과 터널 이외의 토목 구조물의 손상도 평가기술 및 보수보강 기술 개발에 중요한 선행 기술이 될 것으로 기대됨

▶ 제4요소기술 : 복층터널 화재안전 평가 및 관리시스템 구축

◦ 복층터널 화재 위험특성 분석기술 확보

◦ 복층터널 적용 가능 화재시나리오의 개발로 국내 터널방재분야 운영기술 향상

◦ 시나리오기반 소화설비 적용 정량적 안전도 평가방법론 제시로 평가체계 확보

◦ 비상시 위치기반의 피난자의 최적 피난루트를 제공, 인명구조에 필요한 소방대와의 협력체계 구축이 가능한 기술임. 따라서 스마트 IT 기술과 관련하여 스마트 폰용 어플 개발 산업과 WPAN 망 구성 산업의 성장을 유도할 수 있으며, 특히 최근 각국에서 LBS(Location Base System) 산업을 선도할 수 있을 것으로 예상됨.

◦ 전용감지기 기반이 아닌 범용 CCTV기반의 터널유고감지시스템을 개발함.

- CCTV 시스템과의 유고감지 데이터의 연동 시스템 (중복투자 방지됨)

◦ MegaPixel 급의 디지털 고화질 영상 적용가능하여 시스템 영상분석의 정확성을 향상시킴.

◦ 터널내 CCTV 렌즈 제어기 개발, 영상감지기 설치 및 유지보수 용이하도록 기구적 취부 메커니즘의 개발함
◦ 로컬단 개별적 영상유고분석장치를 설치하므로서 영상분석서버의 부하문제,
◦ 상기 기술개발을 통해 최종적으로는 영상유고 분석 ASCI IC화 모듈 개발이 가능하게 되고 이를 통한 상용화와 터널 내 영상유고감지시스템 운영시 요구되는 시스템 기능 및 기본 성능에 대한 표준화된 성능시험과 평가방법을 정의할 수 있음
◦ 복층터널 특성 반영 화재감지 알고리즘 설계 및 테스트베드 차량 실물화재 실험을 통한 영상 빅데이터 수집 및 데이터 셋 작성
◦ 이를 통하여, 향후 적용 대상터널의 영상분야 인공지능 딥러닝 기술 적용을 위한 프레임워크 제공에 기여 할 것임
◦ 또한 영상유고전용감지기 방식 시제품으로 개발함으로써 4차산업 핵심 기술인 IoT 기술 환경 구성이 가능함

(3) 사회적 파급효과

■ 1세부 : 복층터널 최적화 설계기술 개발

▸ 제1요소기술 : 복층터널 최적화 단면 설계기술

◦ 국내 서울시 및 광역시에서 계획하는 도심지 대심도 터널계획 및 설계에 적극적인 반영이 기대됨
◦ 복층터널의 IC/JCT 연결로 분기구간은 단면의 형상이 복잡하고 대단면 터널을 시공함에 따라 단계별 분할 굴착시 붕락·붕괴의 위험성이 높으므로 안정성이 뛰어난 굴착설계기술 개발을 통해 인명피해 사고의 위험을 감소시킬 수 있을 것으로 예상됨

▸ 제2요소기술 : 복층터널 구조체 설계 및 성능평가 기술

◦ 국토해양 R&D 발전전략, 국토종합계발계획 수정계획, 녹색성장 국가전략 등의 정부정책 목표 달성에 기여.
◦ 대심도 교통물류네트워크 구축 기술분야의 사회적 비용절감효과 및 녹색산업 성장 예상.
◦ 세월호 사고 이후 방재기술에 대한 전국민적 관심이 증가하고 있는 시점에서 지진과 같은 대규모 자연재해에 선제적으로 대응할 수 있는 복층터널의 내진해석 및 설계기술 개발을 통하여 안전한 터널 구조물로서의 사회적 공감을 얻을

수 있을 것으로 예상됨

◦ 국토해양 R&D 발전전략, 국토종합계발계획 수정계획, 녹색성장 국가전략 등의 정부정책 목표 달성에 기여

◦ 대심도 교통물류네트워크 구축 기술분야의 사회적 비용절감효과 및 녹색산업 성장 예상

◦ 터널 구조체를 통과하는 교통하중에 의한 진동에 따른 구조체의 응답특성을 분석하여 민원이 제기될 수 있는 소음, 진동문제에 선행하여 대응할 수 있다.

◦ 터널 구조체를 통과하는 교통하중에 의한 진동에 따른 구조체의 응답특성을 분석하여 민원이 제기될 수 있는 소음, 진동문제에 선행하여 대응할 수 있다.

▶ **제3요소기술 : 복층터널 근접시공 안정성 확보를 위한 설계기술**

◦ 도심개발로 인해 지반침하와 인접구조물의 피해는 인재로 분류되고, 인근 주민들의 불안감은 커져가고 있음. 본 연구를 통해 도심지 대단면 복층터널 시공시 문제점을 파악하고, 대책을 강구하여 시민들의 불안감을 해소하고 신뢰를 해복할 수 있을 것으로 판단됨.

◦ 공동연구기관은 교육을 담당하는 대학기관으로서 연구를 수행하는 석사 및 박사과정 학생들의 전문지식 습득에 많은 기여가 예상되며, 국외 관련 학술대회에서의 발표나 논문집 게재를 통하여 국내 학문발전에 기여하고 국제적으로도 국내 학문수준의 위상 제고가 가능할 것으로 예상됨.

▶ **제4요소기술 : 복층터널 내부시설 운전자 친화 설계 기술개발 및 가상 프로젝트**

◦ 복층터널은 친환경 선진교통 인프라 시설을 적용 개발함에 따라 장대 복층터널로 인한 안전성 문제가 중요한 문제로 대두되고 있기에 이러한 입체형 표지판을 통하여 터널에 사고 발생시 인명피해를 최소화 할 수 있는 사회적인 공감대 형성 가능

◦ 고효율로 집광된 태양빛을 시설한계에 제한받지 않으며 장거리 형태로 터널입구에 조사 할 수 있는 시스템은 지하보도 및 지하광장, 지하주차장등에 적용하여 정부시책에 부합하는 신재생에너지 활용과 적용 가능성등 파급효과가 더욱 클 것으로 사료됨.

◦ 시공이 편리한 친환경 불연도료를 적용함으로서 지하구조물 내의 작업자 안전도 확보할 수 있고, 미관 수려 및 쾌적한 지하환경을 제공할 수 있어 환경적, 경제적인 유지관리 효과가 기대됨

◦ 지하공간을 활용한 도로계획은 지상에서 발생시키는 환경오염 물질 배출, 소음 공해 등의 여러 공해들을 경감시키는데 도움을 줄 것으로 판단됨.

▸ 제5요소기술 : 복층터널 다목적 활용 설계 및 운영 기술

◦ 기존 하수도 용량을 대체하여 홍수방지 능력이 향상되며 이는 국민의 안전과 직결되는 문제이며 우기 이외의 기간에는 도심지 교통문제가 동시에 해결가능한 기술을 기대할 수 있음.
◦ 도심지 간 또는 도심지 및 지방 다목적 복층터널 연계를 통하여 도심지 녹지공간 확보, 도시경쟁력 증가, 도시환경의 창출 등의 효과를 도출할 수 있으며 안정적인 수자원 관리로 인한 국민 생활 편의성 증진이 기대됨.
◦ 전문인력 양성.
  - 본 연구를 통해 도시홍수방어 분야의 전문인력의 지속적인 연구토대를 마련함과 동시에 본 연구 수행과정 중 연간 약 1~2명 씩 전문인력을 배출할 수 있을 것으로 기대

■ 2세부 : 효율적인 복층터널 시공기술 개발

◦ 브라켓의 안전성 검증과 슬래브 설치로 인한 라이닝의 거동을 연구함으로서 비교적 위험요인이 증대된 대형 복층 터널구조물의 안전성이 확보되어 사고예방 및 신뢰성 향상이 기대됨

▸ 제1요소기술 : 복층터널 최적화 시공을 위한 굴착·보강, 구조체 구축 및 유지관리 기술 개발과 Test-bed

◦ 전 세계적으로 도시화가 급진전되고 있는 상황으로서 현재 50% 수준인 도시화 비율이 2050년에는 75%가 될 것으로 전망되고 있음(UN, 2004)
◦ 따라서 대도시권에 밀집된 인구와 인프라로 인해 지상 가용공간이 매우 부족한 상황으로서 지속가능한 발전의 대안으로서 지하공간 개발에 적극적인 대처가 가능
◦ 커팅헤드 설계 기술의 확보로 공사 중 민원저감과 시공성 향상에의 기여하고, 자원 채굴 장비, 사회간접시설 건설장비 개발 기반 확보 가능
◦ 성공적인 Test-bed 구축을 통해 향후 발주될 지하공간을 활용한 국가 R&D 프로젝트에 기폭제 역할을 하고, 전세계적으로 많지 않은 복층 터널 실대형 Test-bed를 구축함으로써 건설 선진국으로서의 국제 위상 높임
◦ 공기단축을 위한 슬래브 시공법 및 시공장비 개발은 복층터널의 완공을 앞당겨 국민들에게 빠른시기에 제공할 수 있어서 교통지체로 인한 경제·산업적 피해를 경감시켜 만족도와 신뢰도를 향상.

◦ 중간 슬래브 시공기술은 지하역사 및 지하 대공간의 시공에도 적용될 수 있어 미래에 발주될 해외 대규모 프로젝트에서 기술적 우위가 기대됨.
◦ 요구가 증대되고 있는 지하구조물의 기술적 기초를 제공함으로서 지하구조물 활용 활성화에 대한 기여가 기대됨
◦ 근접터널에 따른 필라부 보강공법 개발시 일반 병렬터널 대비 굴착폭 감소로 시공중 교통혼잡 유발이 감소될 것으로 기대되고, 도심지 공간활용도가 높아져 지상부는 쾌적한 주거환경을 구현할 수 있을 것
◦ 대심도 복층터널의 시공안전성 확보가 가능한 선진 기술 개발을 통해 국가 위상 증진 및 해외 대심도 복층터널 건설 수주 가능성 증대가 기대됨
◦ 대심도 복층터널 내부형상 모니터링 기법의 원천기술 확보를 통해 기술 및 제품의 수출이 가능함
◦ 보다 안전하고 효율적인 대심도 복층터널의 시공 및 유지관리로 발생 가능한 사고를 미연에 방지하며 이를 통해 국민 안전 증대 및 사회적 불안감 감소가 기대되며, 설계 단계에서 물량산출과 함께 안정성을 판단 할 수 있는 기술은 다른 사회 인프라에도 적용이 가능할 것으로 기대됨

▶ 제2요소기술 : 도심 대심도 수직구의 친환경 시공기술 개발

◦ 공기단축을 위한 수직구 시공법 및 시공장치 개발은 복층터널의 도심 대심도 수직구 시공으로 전체 완공기간을 앞당겨 지역 국민들에게 교통지체로 인한 경제·산업적 피해를 경감시켜 만족도와 신뢰도를 향상.
◦ 수직구 히팅 슬립폼 시공기술은 지하철 및 전력구, 산악 수직터널 시공에도 적용될 수 있어 미래에 발주될 해외 도심지 및 산악지역 장대터널 프러젝트에서 기술적 우위가 기대됨.
◦ 수직구 장치개발을 통해 건설분야 뿐만 아니라 기계, 금속, 지하 전력시설의 발전을 동시에 도모할 수 있을 것으로 예상됨.
◦ 기존 수직구 RC 층간 현장타설 공법은 동바리, 거푸집 등을 사용함에 따라 잔존 폐기물이 발생하는 것과 비교하여 가설 폐기물 발생이 최소화 되고 크레인 장비 사용 시간도 최소화 되어 친환경 에너지 및 자원절약 효과가 매우 우수함

▶ 제3요소기술 : 도심 대단면 복층터널 고함수비 굴착버력 친환경 급속처리기술 개발

◦ 기존의 야적장에서의 처리방법은 대규모의 고화제 혼합을 이용하기 때문에 혼합시 발생되는 분진 등으로 인한 작업환경에 악영향을 미칠 것으로 이로 인한 민원 등으로 공사에 차질이 예상됨
◦ 갱내에서 버력을 처리할 경우 작업장에서의 별도 작업이 없기 때문에 작업장내

작업환경에 영향을 미치지 않으며, 별도의 고화제를 사용하지 않기 때문에 갱내에서도 작업환경에 영향을 미치지 않아 환경적인 문제를 야기하지 않을 수 있음

◦ 고함수비 버력을 단시간내에 급속고화처리할 경우 작업장을 최소화 할 수 있으며,고화처리된 버력은 운송 및 처리가 매우 간편해 짐.

◦ 급속고화 처리된 버력은 환경문제 및 민원 발생을 방지하며, 즉시 성토재 등으로 재활용이 가능하여 사회적 비용을 절감할 수 있음

■ 3세부 : 복층터널 환기 및 화재안전 설계 기술 개발

▶ 제1요소기술 : 복층터널 네트워크형 환기 설계 및 해석 기술

◦ 지하터널에서의 이용자들의 불안감 및 기피현상 해소를 위하여 쾌적한 지하터널의 운영은 이용자들의 이용을 증가시킬 수 있으며, 이는 교통체증의 분산에 큰 영향을 끼칠 것으로 판단됨.

◦ 본 기술은 최근 중요하게 부각되고 있는 대규모 지하공간의 활용에도 적용이 가능할 것으로 예측됨에 따라서 다양한 R&D 프로젝트에 벤치마킹될 것으로 기대됨.

◦ 과학적, 합리적인 환기 시스템 소프트웨어 개발로 환경 산업에 국제적 위상 높임

◦ 지하역사, 지하상가, 각종 지하시설 이용 시 미세먼지에 대한 불안감 해소.

▶ 제2요소기술 : 복층터널 오염물질 확산 예측 및 외부 배출 방지 기술

◦ 향후, 건설이 증가할 것으로 예상되는 복층터널에 대한 환기량 산정 및 환기기 운영기술을 개발함으로서 사회적으로 문제가 되는 터널갱구에서 오염물질 배출량을 제어하는 기술로 활용 가능함.

◦ 터널 이용자의 안전운행 및 쾌적성을 향상

◦ 터널 내 오염물질 배출 저감 기술과 친환경적 환기탑 설치 기술의 개발은 지역주민의 안전성 확보와 불안감을 해소하여 지역 갈등을 완화시키는 핵심 방안이 될 수 있음.

◦ 복층터널 대배기구의 포트 설치 최적화는 터널 내 급기되는 신선공기의 분배를 고르게 하여 터널 내 신선한 공기가 균등하게 공급되도록 하는 기술로써 이용자의 쾌적한 실내 환경을 조성하여 신뢰성을 확보하고 이용률 증대에 기여할 것으로 예상됨.

▶ 제3요소기술 : 복층터널 화재확산 제어 및 내화 성능 향상 기술

◦ 원격 자동 소화설비 시제품을 개발하고 실규모 화재실험을 통한 다양한 실험 Data를 확보함으로 성능검증을 완료하여 실제 터널 및 지하도로에 적용 가능한 기술로 발전시켜 기존 방재시설 대비 선진화된 기술 국내에 적용 가능 (실용화 단계)
◦ 본 시스템의 경우, 국외보다 앞 선 연구단계수준이기 때문에 폐합된 공간의 초기소화진압 기술로 상용화 하여 해외 공사에 새로운 방재기술로 적용가능하여 차별화된 수주에 기여 가능
◦ 핵심기술의 산업재산권 확보와 관련 기업과의 기술실시계약 체결 및 기술지도를 통해 개발기술의 상용화를 진행중
◦ 기존 터널의 경우, 터널위험도 증가에 따른 방재시설이 확충이 요구되는 가운데 본 시스템을 통하여 터널의 안전도를 높일 수 있는 대체기술로 많은 도로터널에 적용
◦ 서해대교 차량화재에서 보듯이 차량 화재는 차량 연료 등 가연성 폭발 물질을 포함하고 있는 화재강도가 높은 화재이며 급속한 확산이 예상되는 상황에서, 이런 화재가 대심도 터널 내에서 발생되어 인명 손실까지 초래한다면 대심도 터널의 안전성에 대한 사회적 저항이 야기될 것임. 이를 위하여 내화기술 개발 및 적용은 사회적으로 화재로부터 안전한 대심도 터널에 대한 인식 제고 및 화재 발생 후라도 구조체 손상을 기술적 절차에 따라 적절한 보수 보강이 이루어져서 사용상 문제를 해결한다면 향후 복층 터널의 적용이 확대될 것으로 기대됨
◦ 네트워크형 대심도 복층터널 화재연기 확산지연장치 시제품 개발하여 일반도로 터널에 제연보조설비로 적용

▶ 제4요소기술 : 복층터널 화재안전 평가 및 관리시스템 구축

◦ 복층터널 운영기관 대상 매뉴얼 개발로 통한 관리로 터널 내 사고율 감소
◦ 사전 위험요소의 제거, 운영효율적 관리개선 및 지속적인 사고예방으로 안전한 터널공간 활용가능
◦ 터널 화재 안전관리 운영방안 선진화 및 국제화
◦ IT 강국의 국제적 위상 제고와 스마트한 피난환경의 확보로 대국민 안전시스템 개선효과를 충분히 홍보할 수 있을 것으로 판단되면, 기존 대피방법보다 진일보한 기술제공이 가능하며, 기타 지하역사, 지하상가, 지하공연장 등에 대국민

밀집장소에서의 비상시 대피 불안감 해소가 가능할 것으로 예상됨

◦ 복층터널 특성이 반영된 영상유고감지시스템이 기술적 우수성과 범용성, 경제성이 입증된다면 일반터널/일반노선 확대적용을 통한 고속도로관리기반이 마련되고 안전한 도로환경이 구현될 것임

◦ 복층터널 특성이 반영된 영상유고감지시스템의 기술적 우수성과 범용성, 경제성 입증을 통하여 일반도로, 교량, 터널, 철도 등 SOC 산업분야에서 사회 보편적 장치로서 대국민이 부지불식간에 안전을 보장받을 수 있도록 충분한 역할을 수행 할 것으로 예상됨

참고문헌

1. 강원발전연구원(2015), "강원도 도로터널의 효율적 운영·관리 방안"
2. 건설교통부(2001), "터널 유지관리매뉴얼"
3. 교면포장 설계 및 시공 잠정지침 (2011), 국토해양부.
4. 국토교통부(2012), "도로설계편람 6편"
5. 김기환외 6명, "대심도 지하도로 설계사례", 한국터널지하공간학회(2012)
6. 김학문(1997), "쌍굴터널 굴진에 따른 주변지반의 거동과 간섭효과", 터널과 지하공간, 한국암반공학회, Vol. 7, pp. 136~142
7. 도로공사(2009), "소형차전용도로 도입방안 연구"
8. 도로교설계기준 (2012), 국토해양부.
9. 도로설계요령(02) 한국도로공사
10. 라텍스혼합개질콘크리트(LMC) 교면포장공사 전문 시방서 (2000), 한국도로공사.
11. 박원희 (2015), 터널 환경측정 시스템 개발 및 측정1 '개발 시스템 및 지하철터널 측정'
12. 박준영, 김형배, 류성우, 이재훈, 이용현 (2015), 터널 내 콘크리트 포장의 고기능성 표면처리 공법(NGCS) 적용성 평가, 한국도로학회 학술발표회 논문집, 한국도로학회, pp. 73-73.
13. 서초구(2017), "공간구조개편 타당성조사 연구"
14. 유현수(2014), "저토피 다층지반에서 근접 병설터널 필라의 안정성 평가", 충북대학교 대학원, 공학석사학위논문
15. 이상기후의 원인분석 및 방재대책 (2008, 오재훈)
16. 지하공간의 침수방지 대책에 관한 연구, 행정자치부(2004)
17. 터널 내 줄눈 시멘트 콘크리트 포장 설계 및 시공 지침 (2015), 도로교통연구원.
18. 터널설계실무자료집(00), 한국도로공사
19. 터널표준시방서(2009), 국토해양부
20. 하자현황 분석에 따른 교량 신축이음장치 적용형식 검토 (2002), 한국도로공사.
21. 한국산학기술학회논문지, 16(2), pp. 8608-8615.
22. 행정자치부(2004), "지하공간의 침수방지 대책에 관한 연구"
23. Hoek. E. and Brown, E. T.(1980), "Empirical Strength Criterion for Rock Masses", J. Geotech Engineering Div. ASCE 106, pp. 1013-1035.
24. Je-Sung Jeon(2006), "The Present State and Behavior Characteristics of Water Supply Tunnel", KGS Fall Conference.
25. Keith W. Anderson, Jeff S. Uhlmeyer, Tim Sexton, Mark Russell, Jim Weston (2014), Evaluation of Long-Term Pavement Performance and Noise Characteristics of the Next Generation Concrete surface : Final Report, WA-RD 767.2.
26. Kim, Y.G et al.(2002), "A Study on the efficient plan of maintenance monitoring for tunnel", Tunnelling Technology, Vol. 4, No. 4
27. Korea Expressway Corporation,(2004), "Establishment of measurement standard for tunnel maintenance and development of integrated operation program".
28. Korea Infrastructure Safety Coroporation, (2001), "Tunnel maintenance manual"

29. Korea Water Resources Corporation.(2007), "Guidelines for the design and construction of waterway tunnels
30. Lee, Chia Han, Wang, Tai Tien, Chu, J.H(2013), "Mountain Tunnel Maintenance in Taiwan", KISTEC NO. 42
31. Matsuda, T.(1998), "Ground Behavior and Settlement Control of Twin Tunnels in Soil Ground" Tunnels and Metropolises, vol. 16, no. 2, pp. 1193-1198.
32. Ministry of Construction & Transportation.(2001), "Tunnel Maintenance Manual"
33. Ministry of Environment.(2007), "Waterworks facility maintenance manual".
34. Peck, R. B.(1969), "Deep excavations and tunneling in soft grounding". 7th Internation Conferences, Soil Mechanics and Foundation Engineering., pp. 225-290.
35. Research Institute for Gangwon.(2015), "Efficient operation and management plan for tunnels in Gangwon-do"
36. Woo, J.T, Lee, K.I (2012), "A study on establishment of measurement and analysis frequency of maintenance monitoring in tunnel", Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 14, NO.2.

비매품/무료
93530
9 791187 770848
ISBN 979-11-87770-84-8

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 건설기술연구사업의 연구보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 건설기술연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

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