

R&D / 20SCIP-B105148-06

도심지 소단면(Φ 3.5m급) 터널식 공동구 설계 및 시공 핵심기술 개발 최종보고서

2020. 05. 29.

주관연구기관 / 한국과학기술원
협동연구기관 / 한국건설기술연구원
한국전력공사 전력연구원

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

‘도심지 소단면(Φ3.5m급) 터널식 공동구 설계 및 시공 핵심기술 개발’ (연구개발 기간 : 2015.11.30 ~ 2020.05.29) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2020. 05. 29.

주관연구기관명 : 한국과학기술원 (신 성 철)

협동연구기관명 : 한국건설기술연구원 (한 승 헌)

협동연구기관명 : 한국전력공사 전력연구원 (김 숙 철)



주관연구기관책임자: 조 계 춘 (한국과학기술원)

협동연구기관책임자: 이 성 원 (한국건설기술연구원)

김 경 열 (한국전력공사 전력연구원)

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	20SCIP-B105148-06	해당 단계 연구 기간	2018.03.01~ 2020.05.29	단계구분	3단계/ 3단계
연구사업명	중사업명	건설기술연구사업			
	세부사업명	-			
연구과제명	대과제명	도심지 소단면(Φ3.5m급) 터널식 공동구 설계 및 시공 핵심기술 개발			
	세부과제명	(1세부) 도심지 터널식 공동구 최적 설계용량산정 및 글로벌 표준화 설계기술 개발 (협동-한국건설기술연구원)			
		(2세부) 도심지 소단면 터널식 공동구 굴진을 예측기법과 급곡구간/특수지반 급속 시공 기술 개발 (협동-한국전력공사 전력연구원)			
		(3세부) 공동구용 수직구 저소음(60dB(A))/무진동 급속굴착(1m/day) 시공기술 및 장비 개발 (주관-한국과학기술원)			
연구책임자	조계춘	해당단계 참여 연구원 수	총: 199 명 내부: 199 명 외부: 0 명	해당단계 연구개발비	정부:11,414,000천원 기업: 4,063,161천원 정부 외: - 천원 계: 15,477,161천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 318 명 내부: 318 명 외부: 0 명	총 연구개발비	정부:19,200,000천원 기업: 7,731,072천원 정부 외: - 천원 계: 26,931,072천원
연구기관명 및 소속 부서명	한국과학기술원 건설 및 환경공학과			참여기업명 한국토지주택공사 토지주택연구원,(주)대정 컨설턴트,(주)한국종합기술,유니콘스(주),(주)평 화엔지니어링,(주)희송지오택,(주)우성디앤씨, 한국전력공사 전력연구원,이엠코리아(주),(주) 콘텍이엔지,(주)수성엔지니어링,(주)동아지질, (주)진성티이씨,(주)에이치비씨,(주)제영이앤씨, (주)네오시티,(주)세니츠코퍼레이션	
국제공동연구	상대국명: -			상대국 연구기관명: -	
위탁연구	연구기관명:(주)에이치비씨,University of New South Wales			연구책임자: 김한성,장일한	
※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음					
연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반과제				

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록· 기탁 번호	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	N	N	N	N

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호
한국전력 공사 전력 연구원	EPB Shield TBM Φ3,540mm	EPB Shield TBM Φ3,540mm	1	2018.05.23	2,150,000 (VAT 포함)	이엠코리아(주) (055-211-9600)	한국과학기술원 문지캠퍼스 공동구연구센터	NFEC-2018- 07-244876

요약

도심지 소단면(Φ3.5m급) 터널식 공동구 설계 및 시공 핵심기술 개발을 목표로 도심지 소단면 터널식 공동구에 대한 1) 최적 설계용량산정 및 글로벌 표준화 설계 기술 개발, 2) 굴진을 예측기법과 급곡구간/특수지반 급속 시공기술 개발, 3) 공동구용 수직구 급속시공을 위한 저소음/무진동 시공시스템, 보강/차수 기술 개발의 3가지 세부 과제를 통해 연구가 진행되었다. 본 연구 과제 핵심연구성과로 공법 및 기법 13개, 장비 및 장치 3개, 재료 및 자재 4개, 정책제도 4개, 소프트웨어 1개, 기타 2개이며 총 27개의 핵심 연구 성과를 도출하고자 함. 개발된 기술은 민원 30% 저감, 안전재해 20% 저감, 건설비용 10% 절감 등 탁월한 경제적 효과를 지닐 것으로 예상된다.

보고서 면수: 228페이지

〈 요약문 〉

연구의 목적 및 내용	◦ 전선로·통신선로·수도관 등 기존의 다양한 지하매설물을 공동 수용하는 공동구는 국토 공간 내 기반시설과 이의 연결망으로 구성되는 ‘라이프라인’의 일부로, 특히 우리나라의 높은 도시화율을 고려할 때 [도심지 소단면(Φ3.5m급) 터널식 공동구 설계 및 시공 핵심기술]은 도심지내 지하매설 사회기반시설의 경제성 향상을 위한 필수 기술이며 본 연구의 목표임. ◦ 이를 달성하기 위해 필수적인 중점기술들인 도심지 터널식 공동구 최적 설계용량 산정 및 글로벌 표준화 설계 기술, 도심지 소단면 터널식 공동구 굴진을 예측 기술 및 급곡구간/특수지반 급속시공 기술, 공동구용 수직구 저소음/무진동 급속 시공 기술을 개발하고자 함. 이를 위해, 다음 3 가지 중점기술 개발 목표를 설정함: 1) 도심지 터널식 공동구 최적 설계용량산정 및 글로벌 표준화 설계기술 개발 2) 도심지 소단면 터널식 공동구 굴진을 예측기법과 급곡구간/특수지반 급속 시공기술 개발 3) 공동구용 수직구 급속시공을 위한 저소음/무진동 시공시스템, 보강/차수 기술 개발 본 연구의 3 가지 중점기술 개발 목표를 달성하기 위해 각 중점기술을 3개 세부과제로 구성하였으며, 각 세부과제의 연구내용 및 범위는 다음과 같이 설정함: [제1세부과제] 도심지 터널식 공동구 최적 설계용량산정 및 글로벌 표준화 설계기술 개발 - 제1-1요소기술: 도심지 공동구 수용시설별(3종이상) 설계용량 및 단면 최적화 기술 개발 - 제1-2요소기술: 터널식 공동구의 글로벌 표준화 설계법(LRFD) 개발 - 제1-3요소기술: 도심지 터널식 공동구 전주기 및 수용시설별 안전관리기술 개발 [제2세부과제] 도심지 소단면 터널식 공동구 굴진을 예측기법과 급곡구간/특수지반 급속 시공기술 개발 - 제2-1요소기술: 쉘드TBM 현장굴진자료 DATA분석을 통한 굴진성능 예측 및 산정 기법 제시 - 제2-2요소기술: 소단면 터널식 공동구 급곡구간(R30m 급) 쉘드TBM 추진기술 및 중절장치 개발 - 제2-3요소기술: 소단면 터널식 공동구 특수지반/특수조건 쉘드TBM 급속(downtime 40% 이하) 시공기술 개발 - 제2-4요소기술: 소단면 터널식 공동구 시공기술에 의한 소단면 터널식 공동구 성능검증 시설 개발 [제3세부과제] 공동구용 수직구 급속시공을 위한 저소음/무진동 시공시스템, 보강/차수 기술 개발 - 제3-1요소기술: 공동구용 수직구 저소음/무진동 급속굴착(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발 - 제3-2요소기술: 공동구용 수직구 하향식 라이닝 현타 급속(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발 - 제3-3요소기술: 공동구용 수직구 접속부 보강/차수장치(심도 20m 이상) 및 바이오 폴리머 차수공법 개발				
	연구개발성과				
	연구개발성과의 활용계획 (기대효과)				
	국문핵심어 (5개 이내)				

터널식 공동구	공동구 수직구	급속시공	급곡굴착	한계상태설계
---------	---------	------	------	--------

< SUMMARY >

Purpose & Contents	◦ Utility tunnels, which assimilates various existing underground utilities such as electric lines, communication lines, piping systems etc., are part of the 'lifeline' project that incorporates national infrastructure and various underground utilities. ◦ Considering the high urbanization rate in Korea, the [Urban small-diameter (Φ3.5m size) tunnel-type utility tunnel design and construction technology] research project is vital to the economic advancement of urban underground infrastructures. To achieve the goals of this project, 3 main technologies were selected for development: 1) Optimum design capacity computation and global standard design technology for urban tunnel-type utility tunnels 2) Excavation rate prediction technology and rapid construction techniques in steep curved section/special ground for urban tunnel-type utility tunnels 3) Rapid low noise / no vibration, reinforcement / isolation construction technology for vertical utility tunnel shafts To achieve the development objectives, each of the 3 main technologies were divided into 3 projects and their respective research content and range are as follows: [Project 1] Optimum design capacity computation and global standard design technology for urban tunnel-type utility tunnels - Technology 1-1: Development of optimum design capacity and cross-section optimization technology for urban utility tunnels for various accommodations (more than 3) - Technology 1-2: Development of global standard design technique (LRFD) for tunnel-type utility tunnels - Technology 1-3: Development of safety management technology for life-cycle and different accommodations in tunnel-type utility tunnel [Project 2] Excavation rate prediction technology and rapid construction techniques in steep curved section/special ground for urban tunnel-type utility tunnels - Technology 2-1: Excavation rate prediction and computation method using analysis of shield TBM construction site excavation data - Technology 2-2: Development of shield TBM propulsion technology and stoppage device for steep curved section (R30m size) in small-diameter tunnel-type utility tunnel - Technology 2-3: Development of rapid construction technology (downtime<40%) for special ground conditions in small-diameter tunnel-type utility tunnel - Technology 2-4: Establishment of full scale performance verification facility for small-diameter tunnel-type utility tunnel [Project 3] Development of a rapid construction system for vertical shaft of utility tunnels that consists of noise and vibration controlled shaft excavation system, tunnel-shaft joint reinforcing system, and cutoff grouting technology - Technology 3-1: Development of a noise and vibration controlled rapid (>1m/day) excavation system - Technology 3-2: Development of a rapid (>1m/day) lining construction system with cast-in-place and top-down construction technology - Technology 3-3: Development of a tunnel-shaft joint reinforcing and inflow water cut-off system (depth>20m), and cutoff grouting technology with biopolymer-based impermeable material
Results	◦ The development results of this project is to achieve a total of 27 key technological outputs, comprised of 13 construction methods and techniques, 3 equipment, 4 materials, 4 policies, 1 software, and 2 etc.
Expected Contribution	◦ The key urban small diameter utility tunnel design and construction technologies that will be developed in this research project will contribute to 30% decrease in civil complaints, 20% decrease in construction accidents, 10% decrease in construction costs and other exceptional economic benefits. ◦ To utilize the technologies developed in this project, active attempts will be made to apply the developed technologies to small diameter tunnels such as electric tunnels, communication tunnels, utility tunnels and on construction sites of participating institutions. ◦ The outputs of this project are applicable to both large and small diameter tunnels, including transportation tunnels, mining tunnels, storage facilities etc., construction of SOC infrastructures such as tunnels, harbors, dams, roads, railroads etc. and foundation excavation for urban structures. The outputs can also improve the quality of the concrete structural code, concrete standard specification, tunnel design standard and tunnel standard specification are expected to advance Korea's construction capability and competence in various underground structures to world class standards, help domestic designers and constructors to enter foreign markets and contribute to the exportation of technology.
Keywords	Utility tunnel Vertical shaft Rapid construction Sharp curved excavation LRFD

< CONTENTS >

1. Outline of Research & Development	1
2. R&D Status in Korea and Overseas	46
3. R&D Contents and Results	82
4. Completion Rate of R&D and Expected Contribution	113
5. Utilization Plan of R&D Results	140
6. Foreign Data Acquired During R&D	164
7. Security Level of R&D Results	194
8. Research Facilities and Equipment	195
9. Safety and Security Fulfillment Results	196
10. Representative Research Results	198
11. Et Cetera	215
12. References	216

[Appendix] Research Content Report

< 목 차 >

제1장. 연구개발과제의 개요	1
제2장. 국내외 기술 개발 현황	46
제3장. 연구수행내용 및 성과	82
제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	113
제5장. 연구개발성과의 활용 계획	140
제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	164
제7장. 연구개발성과의 보안등급	194
제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	195
제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	196
제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	198
제11장. 기타 사항	215
제12장. 참고 문헌	216

[별첨] 주요 연구내용 보고서

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 개요

가. 연구개발의 필요성

(1) 연구의 배경

공동구(共同溝)란 라이프라인의 하나로 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」에 따른 도시 계획시설로 분류되며, 전선로·통신선로·수도관·열수송관·중수도관·쓰레기수송관·가스관·하수도관 등 다양한 지하 매설물을 공동 수용함으로써 도시미관, 도로구조 보전, 교통의 원활한 소통, 효율적인 안전·유지관리 등을 꾀하는 지하 시설물이다. 기존의 지하 매설물들을 공동구로 대체할 경우 도시미관의 개선, 자연재해로부터 전력/통신/가스 등의 인프라 네트워크 보호, 그리고 네트워크 운용의 효율성 제고 등 다양한 긍정적 효과를 볼 수 있기 때문에, 그 필요성에 대한 인식이 확산되고 있는 추세이다. 이에 따라 2010년 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 시행령 개정으로 대규모 개발사업 지역에 공동구 설치가 의무화 되어 전력 공동구에 해당되는 소단면의 공동구 시장이 급격하게 증가될 것으로 전망되고 있다.

공동구의 수용시설 및 규모, 시공 장비 현황, 수직구 적용현황에 따른 종합분석결과에 의하면, 1) 수용 시설은 전력, 통신, 상수 또는 전력, 통신, 난방 등과 같은 3종 이상 수용이 유력하고, 2) 규모는 $\Phi 3.5\text{m}$ 급이 합리적이며, 3) 설치 대상 심도 및 지반은 평균 20m, 층적층 토사지반/암반지반이고, 4) 원형($\Phi 6\sim 8\text{m}$) 수직구가 설치될 것이 유력하다. 그러나 국내의 소단면 공동구 설계 및 시공 관련 기술은 선진국에 비해 상당히 낮은 수준(10~70%)에 머물러 있으며, 이에 따라 국내 공동구 설치에 있어서는 다음과 같은 문제들이 대두되고 있다:

(1) 국내에서는 세계적 추세와 달리 공동구와 같은 지하구조물의 설계 기준이 LRFD(Load and Resistance Factor Design)로 전환되지 못하여 하중과 지반의 불확실성을 고려하지 못하고 획일적인 안전율을 적용되어 경제적이고 효율적인 설계가 불가능하다.

(2) 도심지 내 공동구 설치를 위한 소단면 쉴드TBM 시공시 도심지에서 사유지 침범을 최소화 하고 기존 지장물을 통과하기 위해서는 급곡구간 시공기술이 필수 불가결하나, 국내에서는 곡률반경 최소화 기술 수준이 선진국 (일본의 경우 곡률 반경 15m 시공 사례 존재)에 비해 매우 낮다.

(3) 터널식 공동구의 중요한 설계인자인 굴진율 설계값이 지반조건별로 명확하지 않아 터널시공시 공기지연 및 공사비 증가에 영향을 주고 있다. 또한, 호박돌층, 복합이질층, 고수압 조건 등의 특수 지반 조건에서는 굴진 속도의 저하, 배토량 관리의 어려움, 동공 발생, 지반 침하로 인한 도로 붕괴 등 다양한 시공문제가 발생하고 있으나, 이러한 특수 지반, 특수 조건에서의 시공 기술이 매우 부족한 실정이다.

(4) 도심지 내 공동구 설치를 위한 수직구 암반 굴착은 발파 시공시 민원문제로 저소음/저진동 공법이 적용되나 시공속도가 매우 낮아(0.3m/day) 부지점유 장기화로 인한 교통혼잡,

민원, 공사비증가 등을 유발하고 있다. 선진국에서는 기계화시공을 통해 저소음/무진동 급속 시공을 달성하고 있으나 장비 및 시공비가 매우 고가이므로 도심지 공동구용 수직구(평균 심도 20m 내외)에는 적합하지 않아 국내 도입에 무리가 있다.

따라서, 이상의 문제들을 해결할 수 있는 [도심지 소단면($\Phi 3.5\text{m}$ 급) 터널식 공동구 설계 및 시공 핵심기술]을 개발을 목표로 연구를 수행하였다.

(2) 기술의 정의

본 연구에서 개발하고자 하는 [도심지 소단면($\Phi 3.5\text{m}$ 급) 터널식 공동구 설계 및 시공 핵심기술]의 정의는 도심지 소단면($\Phi 3.5\text{m}$ 급) 터널식 공동구 설계 및 시공에 필요한 핵심 설계 및 시공 요소 기술에 대한 국내 자립화 기술이다. 이는 구체적으로 ① 도심지 터널식 공동구 최적 설계용량산정 및 글로벌 표준화 설계기술, ② 도심지 소단면 터널식 공동구 굴진을 예측기법과 급곡구간/특수지반 급속 시공기술, ③ 공동구용 수직구 급속시공을 위한 저소음/무진동 시공시스템, 보강/차수 기술을 망라하는 포괄적인 기술 체계로 정의될 수 있다. 국내 공동구 설치 관련 정책 및 시장 전망에 기반 하여, 본 연구는 도심지내 20m 심도 내외의 충적층 토사 및 암반 지반에 쉘드 TBM 공법을 통해 시공될 단면 직경 3.5m급 소단면 공동구 및 단면 직경 6~8m급 수직구를 구체적인 연구 대상으로 선정하여 연구의 초점을 맞추었다. 이상을 통해 설정된 본 연구의 중점기술과 핵심성과를 정리하면 표<1.1.1>과 같다.

<표 1.1.1> 연구 대상기술과 목표성과

기술 개발 분야	목표 성과물
도심지 터널식 공동구 최적 설계용량산정 및 글로벌 표준화* 설계기술 개발	도심지 공동구 수용시설별(3종이상) 설계용량 및 단면 최적화 기술
	터널식 공동구의 글로벌 표준화 설계법(LRFD)
도심지 소단면 터널식 공동구 굴진을 예측기법과 급곡구간/특수지반 급속 시공기술 개발	도심지 소단면 터널식 공동구 건설단계별 안전위험요인을 고려한 안전관리기술 개발
	쉘드TBM 현장굴진자료 DATA분석을 통한 굴진성능 예측 및 산정기법
	소단면 터널식 공동구 급곡구간(R30m 급) 쉘드TBM 추진기술 및 중절장치
	소단면 터널식 공동구 특수지반/특수조건 쉘드TBM 급속(downtime 40% 이하) 시공기술
공동구용 수직구 급속시공을 위한 저소음/무진동 시공시스템, 보강/차수 기술 개발	소단면 터널식 공동구 실험대형 성능검증시설 및 운영기술
	공동구용 수직구 저소음/무진동 급속굴착(1m/day 이상) 시공기술 및 장비
	공동구용 수직구 하향식 라이닝 현타 급속(1m/day 이상) 시공기술 및 장비
	공동구용 수직구 접속부 보강/차수장치(심도 20m 이상) 및 바이오 폴리머 차수공법

*글로벌 표준화 용어의 정의는 국내 표준화를 통한 국제 통영성 확보를 말함

(3) 핵심기술별 연구개발과제의 설명

본 연구의 최종목적은 도심지 소단면(Φ3.5m급) 터널식 공동구 설계 및 시공에 필요한 핵심 기술개발이다. 지하 복합공간 시장 창출을 위한 기획·설계·시공·유지관리의 통합 기술 경쟁력을 확보하고, 위험요소 관리를 통한 시설물 안전 및 유지관리 기술 및 재해 예방을 위한 선제적 대응체계를 구축하며, 건설 프로세스의 지능화·효율화, 건설기술의 표준화에 기여할 수 있는 연구로, 안전하고 경제적인 도심지 라이프라인 구축을 통해 쾌적한 도시 생활공간 창출을 목표로 한다. 본 연구의 비전은 “안전하고 경제적인 도심지 라이프라인 구축을 통해 쾌적한 도시 생활공간 창출”로 최종 기대효과는 도심지 시공중 민원 30% 저감, 건설안전 재해 20% 저감, 공동구 건설비용 10% 절감 및 공기단축이다.

이를 위해 3가지 주요 연구로 나누어 각 세부별로 맡아 연구하였고 이는 다음과 같이 ① 도심지 공동구 설계용량산정/단면 최적화 및 글로벌 표준화 설계기술, ② 도심지 소단면 터널식 공동구 굴진을 예측기법과 급곡구간/특수지반 급속 시공기술, ③ 공동구용 수직구 급속 시공을 위한 저소음/무진동 시공시스템 및 보강/차수 기술로 나뉜다. 각 세부 연구과제는 다시 3~4개의 요소기술로 구성되며, 본 연구를 구성하는 각 요소기술들은 그 주요 연구 대상에 따라 표 1.1.2-4와 같이 분류할 수 있다.

<표 1.1.2> 1세부 연구개발 추진체계

■ 1세부 : 도심지 터널식 공동구 최적 설계용량산정 및 글로벌 표준화 설계기술 개발
▶ 제1-1요소기술 : 도심지 공동구 수용시설별(3종이상) 설계용량 및 단면 최적화 기술 개발
(1-1a) 도심지 공동구 수용시설별 설계용량 최적화 연구
(1-1b) 도심지 터널식 공동구 단면 최적화 설계 기술 개발
(1-1c) 도심지 유형별 공동구 설치 타당성 평가시스템 개발
(1-1d) 도심지 터널식 공동구 설치를 위한 LCC 표준공정 및 공사비 관리시스템 개발
▶ 제1-2요소기술 : 터널식 공동구의 글로벌 표준화 설계법(LRFD) 개발
(1-2a) 글로벌 표준화 설계요소기술 개발 및 최적 설계기준 정립
(1-2b) 한계상태설계법에 의한 소단면 터널식 공동구 라이닝 설계 기술 개발
(1-2c) 글로벌 표준화 설계법 적용을 위한 내진해석 및 내진설계 기술 개발
(1-2d) 글로벌 표준화 설계법 적용을 위한 내진해석 및 내진설계 기술개발
▶ 제1-3요소기술 : 도심지 소단면 터널식 공동구 건설단계 (계획·설계·시공)별 안전위험요인을 고려한 안전관리기술 개발
(1-3a) 도심지 소단면 터널식 공동구 건설단계별 안전위험요인을 고려한 안전관리기술 개발
(1-3b) 도심지 소단면 터널식 공동구 시공 중 대형건설재해 대응 기술 개발

<표 1.1.3> 2세부 연구개발 추진체계

■ 2세부 : 도심지 소단면 터널식 공동구 굴진을 예측기법과 급곡구간/특수지반 급속 시공기술 개발
▶ 제2-1요소기술 : 쉼터TBM 현장굴진자료 DATA분석을 통한 굴진성능 예측 및 산정기법 제시
(2-1a) 소단면 터널식 공동구 쉼터TBM의 현장굴진자료 DB구축/굴진을 산정기법 제시
(2-1b) 소단면 쉼터 TBM 복합지반(토사/암반지반) 실굴진을 예측 모델 및 프로그램 개발
▶ 제2-2요소기술 : 소단면 터널식 공동구 급곡구간(R30m 급) 쉼터TBM 추진기술 및 중절장치 개발
(2-2a) 공동구(직경 3.5m급) 급곡(R30m) 시공을 위한 급곡 장치 개발
(2-2b) 급곡구간 소형 쉼터TBM 세그먼트 및 굴진 안정을 위한 시공기술 개발
(2-2c) 급곡구간 세그먼트 라이닝 기술 개발을 위한 세그먼트 보강상세 및 최적형상 개발
(2-2d) 지수재 최적화를 통한 급곡구간 이음부 방수시스템 및 시공기술 개발
(2-2e) 워터젯을 이용한 급곡구간 여굴생성 기술개발
▶ 제2-3요소기술 : 소단면 터널식 공동구 특수지반/특수조건 쉼터TBM 급속 (downtime 40% 이하) 시공기술 개발
(2-3a) 특수지반 분류 및 쉼터 TBM 효율적 통과기법 개발
(2-3b) 특수지반 최적보강 설계기준 및 시방서 제안
(2-3c) 특수지반 쉼터 TBM 최적운용조건 및 장비산정 기법 개발
(2-3d) 특수지반용 고성능 디스크커터 개발
▶ 제2-4요소기술 : 소단면 터널식 공동구 시공기술에 의한 소단면 터널식 공동구 성능 검증 시설 개발
(2-4a) 소단면 터널식 공동구 시공기술에 의한 소단면 터널식 공동구 성능 검증 시설 개발

<표 1.1.4> 3세부 연구개발 추진체계

■ 3세부: 공동구용 수직구 급속시공을 위한 저소음/무진동 시공시스템, 보강/차수 기술 개발
▶ 제3-1요소기술 : 공동구용 수직구 저소음/무진동 급속굴착(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발
(3-1a) 지반 변위와 지하수 유출을 방지하는 수직구 외주면 급속굴착(1m/day) 기술 및 장비 개발
(3-1b) 저소음/무진동 암반지반 급속굴착(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발
(3-1d) 지반 변위와 지하수 유출을 방지하는 수직구 외주면 굴착 장비 개발
▶ 제3-2요소기술 : 공동구용 수직구 하향식 라이닝 현타 급속(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발
(3-2a) 공동구용 수직구 하향식 라이닝 현타 급속(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발
▶ 제3-3요소기술 : 공동구용 수직구 접속부 보강/차수장치(심도 20m 이상) 및 바이오 폴리머 차수공법 개발
(3-3a) 공동구용 수직구 접속부 보강/차수 장치 개발
(3-3b) 수직구 보강/차수를 위한 비시멘트 바이오폴리머 차수공법 개발

(가) 도심지 터널식 공동구 최적 설계용량산정 및 글로벌 표준화 설계기술 개발

① 제1-1요소기술 : 도심지 공동구 수용시설별(3종이상) 설계용량 및 단면 최적화 기술 개발

본 과제는 공동구 수용시설별 설계용량 최적화 기술, 터널식 공동구 단면 최적화 설계 기술, 도심지 유형별 공동구 설치 타당성 평가시스템 및 도심지 터널식 공동구 설치를 위한 LCC 표준공정 및 공사비 관리시스템을 개발하는 것을 목적으로 한다. 20세기 초반이후 도심지는 시민의 주거와 생활환경의 변화에 발맞추어 급격하게 성장하였고, 이로 인해 도심지 도로하부는 시민의 안락한 생활과 사회·경제 활동을 유지하기 위한 전력, 상수도, 통신, 가스, 하수도, 냉·난방 등의 생활공급시설(Life-Line)이 무분별하게 매설되어 관리되었다. 반복굴착을 줄여 비용을 절감하는 등의 효율적 도로관리, 지하공간 정비, 재해로부터 안정적인 공급 확보 등의 필요에 의해 공동구에 대한 사회적 요구가 점차 증대되고 있어, 도심지 공동구 활성화를 위한 터널식 공동구의 설계 및 시공 기술 개발과 더불어 이를 정책적, 제도적 토대 마련이 필요하다. 도심지에 적합한 터널/개착식 공동구를 활성화시킬 수 있는 정책, 제도 및 사업추진 절차 등에 대한 개선방안을 분석하고 이에 대한 결과를 제시하고자 한다.

한국의 공동구 설계 기준은 공동구 설치 및 관리지침('10.02, 국토교통부)에 따라 이루어졌으며, 건설 공법으로는 주로 개착식으로 이루어지며, 현재 국내에서 쉴드 TBM을 이용한 공동구 건설은 미비한 실정이며, 최근 "TBM 핵심 설계, 부품 기술 및 TBM터널의 최적 건설 기술 개발" 연구단에서 TBM의 국산화에 성공하면서 지하 단독구에 대해 쉴드 TBM 적용이 적극 검토되고 있다. 신도시에 비해 인구밀도와 상업지역의 집중도가 높은 기존 도심지에서 쾌적한 도시환경을 요구하는 시민의식이 크게 향상되는 등 도심지 공동구 설치에 대한 사회적 요구가 증가하여, 이에 도시의 유형 및 규모, 공동구 설치 목적 등에 따라 세분화된 타당성 평가시스템과 정량적인 종합평가로 수용시설의 종류 및 규모 등의 설계용량 최적화가 필요하다.

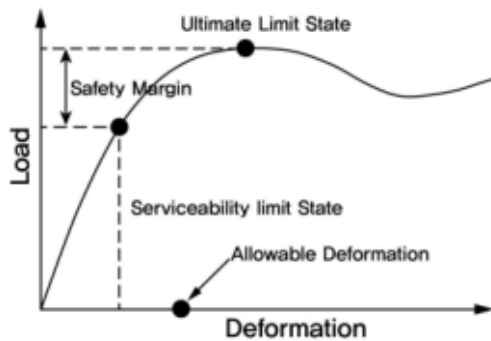
공동구와 같은 공공투자사업의 경제성 평가는 계획 사업의 비용 및 효과를 분석하여 경제적 효율성과 공공투자의 타당성이 검토되어야 하지만, 현재 국내의 건설관련 비용 산정 기법은 공동구에 적합한 모델이 없으므로, 터널식 공동구 설치에 대한 경제성(비용·효과분석, 목표·성취분석, 생애주기비용(Life Cycle Cost)분석 등) 검토뿐만 아니라 터널식 공동구 구조물의 LCC 최적설계, 공동구 내부 수용시설물의 LCC가 필요한 실정이며, 이를 위해 공공투자사업의 경제성 평가를 위한 평가 방법이 정립되고 실용화된 프로그램 개발이 필요하다.

국내에서는 공동구와 관련된 공사/공정관리 시스템 등의 연구가 부족하며, 도심지 공사로 인한 민원 발생이나 공사중 안전사고에 대한 문제가 증대됨에 따라 시공, 품질, 공정, 안전 등과 관련된 요구가 높아지고 있는 실정이다. 도심지 터널식 공동구 시공 및 공정관리 계획을 표준화, 시스템화 하여 표준품셈을 도출하고 지역별, 위치별 도심지 특성이 반영된 최적 공사비 및 공기 산출에 대한 연구 및 관련 프로그램 개발이 필요하다.

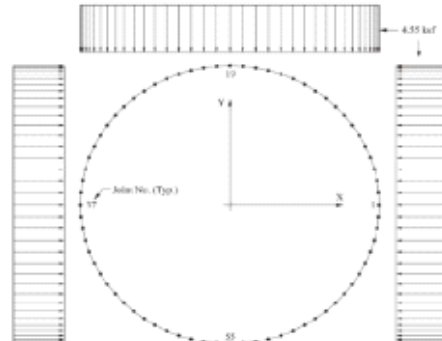
② 제1-2요소기술 : 터널식 공동구의 글로벌 표준화 설계법(LRFD) 개발

본 과제는 글로벌 표준화 설계요소기술 개발 및 최적 설계기준 정립, 한계상태설계법에 의한 소단면 터널식 공동구 라이닝 설계 기술, 글로벌 표준화설계법 적용을 위한 국내 지반 특성값 평가기법 및 글로벌 표준화 설계법 적용을 위한 내진해석 및 내진설계 기술을 개발하는 것을 목적으로 한다. 여기서 “글로벌 표준화”라는 의미는 국제적으로 널리 사용되고 있는 한계상태설계법의 국내 표준화를 통해 국제 통용성을 확보하고자 하는 용어의 의미이다. 한계상태설계법을 근간으로 한 글로벌 표준화 설계법(LRFD)에 관한 국내기술은 아직 초기 단계이며, 특히 지반분야의 경우는 학술적인 차원에 머무르고 있다. 한계상태설계법이란 콘크리트 구조물을 중심으로 그것이 가지는 내구성이나 최종적인 내하능력을 작용하는 하중과의 관계로 구조물을 설계하는 방법으로서, 구조물의 국부적 손상이나 기능장애를 초래하는 한계(사용한계상태), 구조물의 붕괴나 주요손상을 초래하는 한계(극한한계상태)로 구분한다. 지반분야에서는 기초와 옹벽 등 지반구조물 분야에 초기연구가 시작된 수준이며, 최근 TBM 세그먼트 라이닝을 대상으로 한계상태 설계법 적용성을 분석하고 기존 설계법과의 비교 검토를 수행하였으나, NATM 및 TBM 라이닝을 대상으로하는 한계상태법을 고려한 구조설계기준은 아직 제시되지 못하고 있는 실정이다.

현행 공동구 설계기준은 국내에 운용중인 공동구 특성상 개착식박스구조에 대한 기준으로 대부분 콘크리트구조기준을 준용하고 있으나 향후 다양한 공동구 수용시설의 요구, 다양한 지반조건과 지상조건, 성능중심으로 발전되어가는 설계기준에 부합하는 공동구 설계기준의 마련이 필요하다. 그러므로 현행 공동구 설계기준은 국내에 운용중인 공동구특성상 개착식박스구조에 대한 기준으로 대부분 콘크리트구조기준을 준용하고 있으나 향후 다양한 공동구 수용시설의 요구, 다양한 지반조건과 지상조건, 성능중심으로 발전되어가는 설계기준에 부합하는 공동구 설계기준의 마련이 필요하다. 국내에서는 한계상태설계법을 교량 및 콘크리트 설계에 반영하여 적용토록 기준화가 시작되었으나 터널 구조물에 대한 한계상태설계법 적용은 아직 학술적인 차원에 머물고 있고, 그 관련 연구 또한 미흡한 실정이며, 공동구 터널에의 적용 또한 통일된 설계법이 없이 이전 설계법을 사용하여 비효율적이므로 설계기술의 글로벌 표준화가 시급하다. 한계상태설계법은 재료가 가지는 내구성이나 최종적인 저항능력을 구조물에 작용하는 하중과의 관계로 평가하여 토목구조물을 설계하는 방법으로 최적화 설계가 가능하므로 소단면 터널부터 설계이론 정립이 필요하다.

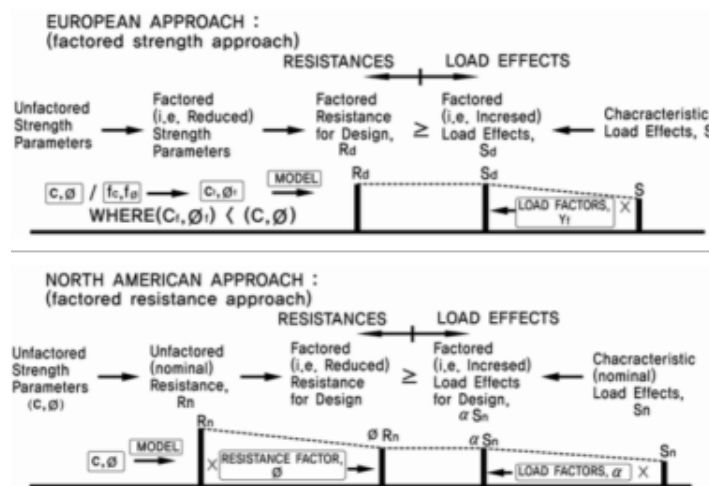


<그림 1.1.1> 한계상태 설계개념



<그림 1.1.2> 라이닝 구조해석 개념

터널식 공동구에서는 터널 라이닝이 한계상태설계법 적용 대상이 되며, 한계상태설계법을 적용하기 위해서는 터널식 공동구에 대한 사용한계상태(S.L.S), 극한한계상태(U.L.S)에 대한 개념정립(하중조합)이 필요하다. 공동구와 같은 지반구조물 설계 시 선진국에서는 한계상태 설계법이나 생애주기비용 등의 사용으로 최적화 설계하는 것이 추세이며, 최근 경제적인 구조물 설계 및 시공을 위하여 유럽 및 미국 등지에서 한계상태설계법(Limit State Design Method)을 기초로 하여 토목구조물 기준 등에 반영하고 있으며, 터널 구조물에 대하여 연구가 활발하게 진행되고 있어 가까운 장래에 터널설계 전반에 도입이 될 것으로 예상된다. 국제 표준화기구는 공용성 및 신뢰성을 설계기준으로 한계상태설계법을 건설설계 분야의 국제 표준으로 채택하고 있으며, 이를 준수하는 것이 WTO 체제의 의무사항으로 되어 있어 글로벌 경쟁시대의 국제건설 환경에서 국제표준화규격(ISO)에 부합하는 세계적 수준의 합리적이고 선진화된 설계기준으로서 한계상태설계법의 토대 마련이 필요한 시점이다.



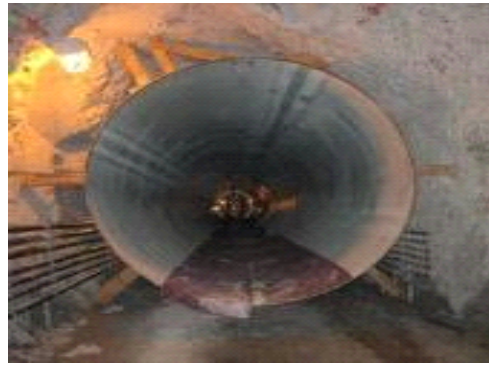
<그림 1.1.3> 한계상태설계법의 개념 비교(유럽 유로코드, 북미 LRFD)

한계상태설계법, 특히 하중저항계수설계법에서 필요로 하는 저항계수와 관련된 지반 특성 값은 다양한 한계상태 정의 및 이에 기반을 둔 터널식 공동구의 하중비, 하중계수 등 하중

조건에 대한 저항계수 평가에 기초자료로 반드시 필요하다. 도심지 지반의 거동으로 인해 공동구에 피해를 주는 주원인 중 하나인 기초지반 침하를 선제적으로 예측하고 해석결과를 내진설계에 반영함으로써 사회적, 금전적 손실을 막고자 한다(아래 사진 참조).



<그림 1.1.4> 지진시 액상화에 의한
하수관거 붕괴



<그림 1.1.5> 지진으로 인한 공동구
붕괴 후 복구현장

기존 국내해석 프로그램 활용결과 지진시 지반의 거동에 따른 공동구 피해 예측이 불가능하고, 지반-공동구 상호작용을 고려한 설계기법 연구의 경우 초기단계다. 국내 지반 특성을 반영한 동적지반물성 DB를 체계적이고 과학적으로 구축하고 이를 토대로 공동구 설치 지역에 대한 지반응답해석을 수행하며, 안정적 공동구 단면을 가지고 내진설계법을 포함한 글로벌 표준화 설계법(LRFD)을 제안하고자 한다.

③ 제1-3요소기술 : 도심지 소단면 터널식 공동구 건설단계 (계획·설계·시공)별 안전 위험요인을 고려한 안전관리기술 개발

본 과제는 도심지 소단면 터널식 공동구 건설단계별 안전위험요인을 고려한 안전관리기술 및 시공 중 대형건설재해 대응 기술을 개발하는 것을 목적으로 한다. 도심지에서 수행되는 굴착공사는 지하수위의 저하와 함께 지반의 변형을 유발하며 특히 소단면($\Phi 3.5\text{m}$ 급) 터널식 공동구의 굴착공사는 지하철, 전력구 및 지하관로 등 지중구조물에 의한 간섭효과를 받기 때문에 건설공사 시 공사현장 및 인접시설물의 안전 확보가 중요하다. 최근 건설 수요가 점증하고 있는 소단면 터널식 공동구는 개착식 공동구보다 재난에 더 취약한 구조를 가지고 있지만 건설공사 및 유지관리 시 발생하는 재난의 예방·대응에 대한 구체적인 대책이 전무하다. 이에 소단면 터널식 공동구의 건설단계 별로 안전위험요소를 발굴(Hazard profiling) 및 방지·저감하는 안전관리기법과 소단면 터널식 공동구 시공 중 대형건설재해 대응기술을 개발하고 매뉴얼을 제작하며 개발된 안전관리 및 시나리오 기반의 건설재해 대응 기법을 현장에 시범적용하고 평가하고자 한다.



<그림 1.1.6> 공동구내 화재발생 및 터널 굴착공사 붕괴사례

(나) 도심지 소단면 터널식 공동구 굴진율 예측기법과 급곡구간/특수지반 급속 시공기술 개발

- ① 제2-1요소기술 : 쉘드TBM 현장굴진자료 DATA분석을 통한 굴진성능 예측 및 산정 기법 제시

본 과제는 소단면 터널식 공동구 쉘드TBM의 현장굴진자료 DB구축/굴진율 산정기법 제시 및 복합지반(토사/암반지반) 실굴진율 예측 모델 및 프로그램을 개발하는 것을 목적으로 한다. 현재 터널식 공동구(전력구) 건설사업을 가장 활발히 수행하고 있는 한국전력 자료에 따르면, 터널식 공동구의 증가율은 2012년(10km/년)에 비해 두 배 이상(23km/년) 크게 증가하고 있으며 매년 늘어나는 추세다.

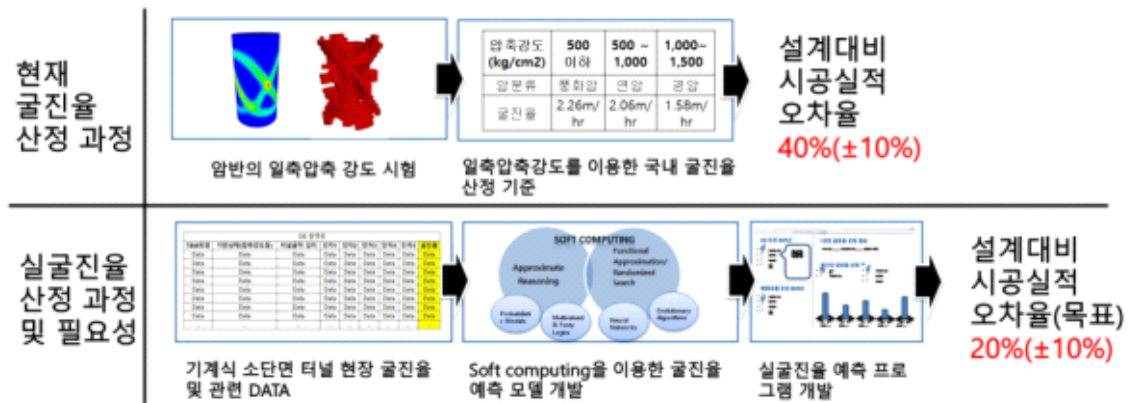
㉔ 전력구 연장 : 2012년 404km -> 2014년 479km, 매년 20~30km씩 증가

㉕ 터널식 전력구 연장 : 2012년 66km -> 2014년 170km (한국전력 송변전운영처)

터널식 공동구는 주로 기계식 굴착장비(쉘드 TBM : 쉘드 Tunnel Boring Machine)를 사용하여 시공하며, 굴착장비의 굴진율, 성능, 지반조건 등에 따라 공기와 공사비용이 결정된다. 터널식 공동구는 굴진 도중 장비의 교체나 개조 등이 불가능하고, 굴진중에 전방 막장 관찰이 어려우므로 굴진 종료시까지 투입된 장비로 최선의 운전을 하여야 한다. 기계식 굴착장비의 굴진율은 공동구 설계시 가장 중요한 영향인자임에도 불구하고 국외처럼 지반조건에 적합한 굴진율 모델을 사용하지 않고, 단일인자(일축압축강도) 만으로 산정한 굴진율을 이용하고 있다. 즉, 터널식 공동구의 중요한 설계인자인 굴진율 설계값이 지반조건별로 명확하지 않아 터널시공시 공기지연 및 공사비 증가에 영향을 주고 있다. 이에, 굴착의 주체가 되는 TBM 장비의 실제 굴진자료 data를 DB화 하여 국내지반특성에 맞는 굴진성능 예측모델, 프로그램 개발 및 설계기준이 필요함 더불어 굴진율을 산정하는 프로그램이 전무한 실정이므로 설계 시 반영 할 수 있는 효과적인 프로그램 개발이 시급하다. 또한 굴착장비 선정기준이 단순하게 터널식 공동구의 총 굴진거리에 따라 기계식 굴장 장비를 선정하고 있고 지반조건별 굴착장비 선정기준이 존재하지 않아 이의 개선이 요구되고 있다.

<표 1.1.5> 국내 굴진율 산정 기준(한국전력공사)

압축강도(kg/cm ²)	500이하	500 ~ 1,000	1,000 ~ 1,500
암분류	풍화암	연암	경암
굴진율	2.26m/hr	2.06m/hr	1.58m/hr



<그림 1.1.7> 실굴진율 예측 프로그램 개발 필요성

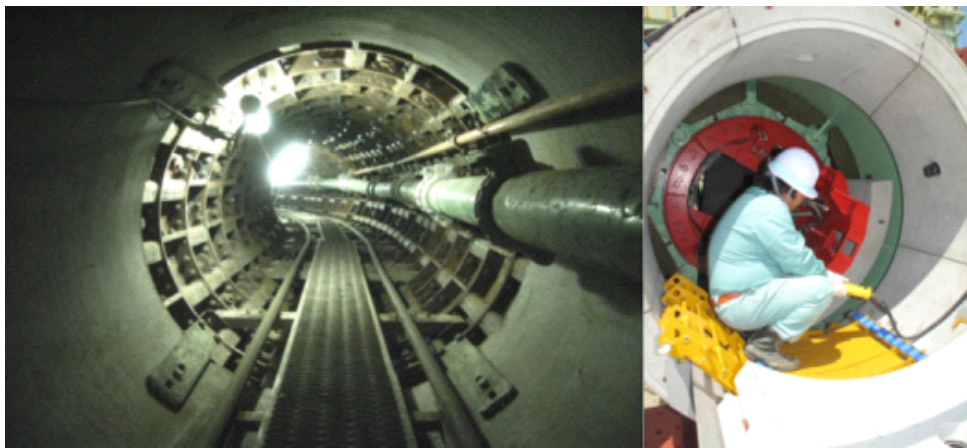
② 제2-2요소기술 : 소단면 터널식 공동구 급곡구간(R30m 급) 쉘드TBM 추진기술 및 중절장치 개발

본 과제는 공동구(직경 3.5m급) 급곡(R30m) 시공을 위한 급곡 장치, 급곡구간 소형 쉘드 TBM 세그먼트 및 굴진 안정을 위한 시공기술, 급곡구간 세그먼트 라이닝 기술 개발을 위한 세그먼트 보강상세 및 최적형상, 지수재 최적화를 통한 급곡구간 이음부 방수시스템 및 시공기술 및 터젯을 이용한 급곡구간 여굴생성 기술을 개발하는 것을 목적으로 한다. 우리나라는 매우 높은 도시인구 비율(91%) 때문에 도로, 철도, 지하철, 전력/통신 시설 등 파이프라인 시설 과밀화 현상과 난개발로 인한 만성적 예산낭비와 각종 민원(시공, 재해, 에너지 수급, 안전사고 등)이 발생하고 있어, 효율적인 지하 공간 활용이 필요하다. 도심지 공동구 평면선형 계획시에는 수많은 지장물이 존재하여 노선의 선정에 악 영향을 주고 지장문 완곡 우회로 인한 연장 및 심도증가로 공사비 증가 요인을 발생시킨다(부지점유, 민원, 교통체증 증가, 공사비 상승). 이에, 경제성을 고려할 때 급곡구간 계획이 불가피함. 그러나 공동구는 일반적으로 R300m로 시공되고 있으며, 국내의 경우 R=60m의 시공실적은 있으나 R30m 급 급곡구간의 시공장비와 기술이 부족하다. R30m 급 급곡구간 시공기술 개발을 위해서는 쉘드TBM 추진기술 및 장비개발, 급곡구간에 적합한 세그먼트 라이닝 시공기술, 급곡구간 세그먼트 이음부 방수시스템 개발 등이 필요하다.

국내의 쉘드TBM 추진시스템에 관련된 기술력은 이론적, 경험적으로 미흡하며 상당 부분을 외국 기술에 의존하고 있다. 추진시스템은 굴진 성능 및 정밀시공에 매우 중요한 부분이며 여러 장비간의 상호 연계를 고려한 기술적 연구가 요구되며, 특히 급곡구간에 대하여서는 관련 기술연구가 시급히 요구된다. 국외의 경우 추진압력, 속도제어 등에 관한 전문적인 연구가 최근까지 진행되고 있으나, 국내의 경우 쉘드TBM 굴착 성능 및 굴착에 따른 지반

거동에 대한 연구와 절삭 메카니즘에 대한 연구가 주를 이루고 있으며 추진시스템에 관한 연구는 미비한 실정이므로 굴진성능과 정밀시공에 밀접하고 중요한 관계가 있는 쉘드TBM 추진시스템에 대한 지속적인 기술연구가 요구된다.

쉘드TBM의 경우에는 굴착과 동시에 구조체 또는 지보재를 시공하기 때문에 급곡구간에 적합한 세그먼트 라이닝 시공기술 연구가 필요하다. 특히, 급곡구간 굴진시 추진잭(jack)의 추력(thrust)은 내측의 오목면보다 외측의 볼록면에 더 크게 작용하고, 추력의 작용으로 인한 편심하중 발생하므로 일반구간이나 반경이 큰 곡선구간의 세그먼트 라이닝과는 다른 성능이 요구된다. 일반구간에서도 세그먼트와 세그먼트, 링과 링간의 집중응력 발생에 의한 파손과 조립 시공시 세그먼트 자중에 의한 처짐발생이 파손의 원인으로 지목되고 있어, 콘크리트나 강재, 또는 합성형의 재료를 이용한 자중감소 노력은 물론, 강도를 증가시키기 위한 세그먼트 라이닝에 대한 연구가 이어져 오고 있다. 그러나, 급곡구간의 경우 일반구간과 비교할 때 편심하중 발생으로 인해 세그먼트간 이음부의 파손이 잦아, 누수발생으로 라이닝의 내구성을 확보하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 해석을 통한 급곡구간용 세그먼트 라이닝의 요구성능을 확립하고 일반구간 대비 보강상세기술 개발이 필요하다. 즉, 라이닝의 구조형상 개선 및 테이퍼링 최적화 기술의 개발, 재료에 따른 라이너 두께별 손상 민감도 분석, 효과적인 연결 및 배치방안, 파손부의 보강기술 등의 연구개발을 통해 급곡구간의 세그먼트 라이닝의 균열이나 파손방지를 위한 기술개발이 요구된다.



<그림 1.1.8> 급곡구간 세그먼트라이닝의 시공

국내 쉘드터널 현장을 대상으로 현장조사 및 문헌조사에 의한 누수의 취약부 및 원인을 분석해보면(문상조, 장석부, 2000) 특히 곡선부에서 누수가 빈번하게 발생하는데 이는 급곡구간 세그먼트 시공(조립) 상의 특이성, 추력의 불균질로 인한 세그먼트의 과도한 균열발생, 곡률반경에 따른 내경과 외경의 차이에 의한 세그먼트 이음부 단차(gap) 및 장기적 변형 발생, 시공상의 어려움으로 인한 과도한 Offset 발생,止水재 선정의 어려움 등을 들 수 있다. 국내의 경우는 대부분 수팽창지수재를 사용하고 있는데, 급곡구간에서는 발생하는 단차로 인하여 이의 사용이 한계성이 있고 따라서 Gasket의 사용을 적극 검토할 필요가 있다. 만약 급곡구간 굴착 장비가 개발되더라도 급곡구간에서 누수가 발생한다면 그 기술은 적용이 불

가능하다. 따라서 급곡구간 세그먼트 이음부 방수기술은 연구단 연구 목표와 부합한다. 또한 기존 기술은 수팽창지수재를 사용하여 굴곡구간 이음부에 적용하고 있으나, 본 연구에서 추구하는 R 30m급에서는 수팽창지수재만을 사용하는 경우 현재의 문제점이 더욱 커진다. 따라서 개발되는 급곡구간의 이음부 방수기술은 새로운 방수시스템으로 작용되어야한다.



<그림 1.1.9> 세그먼트 이음부 누수 현황

③ 제2-3요소기술 : 소단면 터널식 공동구 특수지반/특수조건 쉘드TBM 급속 (downtime 40% 이하) 시공기술 개발

본 과제는 특수지반 분류 및 쉘드 TBM 효율적 통과기법, 특수지반 최적보강 설계기준 및 시방서, 특수지반 쉘드 TBM 최적운용조건 및 장비산정 기법 및 특수지반용 고성능 디스크커터를 개발하는 것을 목적으로 한다. 일반 쉘드TBM 터널 시공시 특수지반/특수조건 (복합지층, 호박돌, 고수압 등) 통과할 때 downtime 발생율은 약 86% 수준이며, 특히 소단면 공동구의 경우 단면규모가 작아 대응용 부대시설 미확보로 시공 효율성이 급감한다. 이를 해결하기 위해, 쉘드TBM 공사가 특수지반/특수조건에서 진행될 시, 효율적으로 통과할 수 있는 방법, 굴착기술, 시공관리시스템 개발이 필요하다.

④ 제2-4요소기술 : 소단면 터널식 공동구 시공기술에 의한 소단면 터널식 공동구 성능 검증 시설 개발

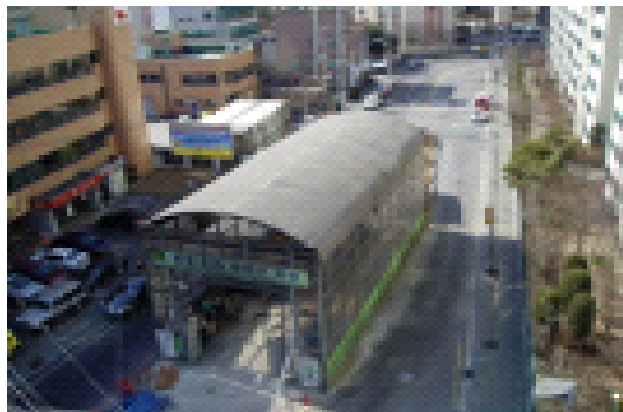
본 과제는 소단면 터널식 공동구 성능 검증 시설을 개발하는 것을 목적으로 한다. 쉘드 TBM의 설계/시공기술 개발의 필요성이 증대하여, 관련 기술이 많이 개발되고 있으나, 현장 여건상 개발된 기술의 현장 적용이 어려워 새로운 기술들이 현장에 적용되지 못하고 사장되는 경우가 있다. 또한, 현존하는 소단면 쉘드 TBM 장비의 실대형 성능검증 기술 및 시설이 전무하여 소단면 쉘드 TBM 장비의 실용화가 저하되어 있다. 이에, 굴착장비의 실대형 성능검증을 통하여 굴착장비가 적용가능한 암반 및 토사 조건들을 찾아 굴착장비의 적용기회를 확대시켜 암반 및 토사조건에 따른 굴착장비 제작비용을 절감할 필요가 있다. 실대형 성능검증 시설이 존재한다면 여러 가지 지반 조건을 모사하여 실제 굴착시 야기되는 문제점을

미리 확인하고 이를 해결 할 수 있는 굴착방법을 개발하여 굴착성능을 향상시킬 수 있다. 결론적으로, 소단면 쉴드 TBM 실대형 성능검증기법을 개발하고 실대형 모사기술을 개발하여 소단면 터널식 공동구 실대형 성능검증 시험시설 구축을 통해 소단면 터널식 공동구 시공요소기술 인증방안 제시가 현업에서 요구되고 있다.

(다) 공동구용 수직구 급속시공을 위한 저소음/무진동 시공시스템, 보강/차수 기술 개발

① 제3-1요소기술 : 공동구용 수직구 저소음/무진동 급속굴착(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발

본 과제는 지반 변위와 지하수 유출을 방지하는 수직구 외주면 급속굴착(1m/day) 기술 및 장비와 소음/무진동 암반지반 급속굴착(1m/day 이상) 시공기술 및 장비를 개발하는 것을 목적으로 한다. 수직구를 설치하려면 도심지 지상부의 부지점유가 필수이므로 이에 따른 문제가 빈번하게 발생한다. 공동구 건설시 도로 및 부지의 점유가 장기화될 경우 이에 의한 도심 교통의 혼잡은 불가피하며 심각한 상태인 서울 및 6대 광역시의 교통 혼잡을 증가시킬 가능성이 크다. 교통 혼잡도가 1% 증가하면 서울과 6대 광역시 교통혼잡 비용은 각각 2015년 기준 950억/년, 1,200억/년에 달하는 심각한 문제가 발생할 수 있다.



<그림 1.1.10> 서울 OO 전력구 공사현장 도로점유

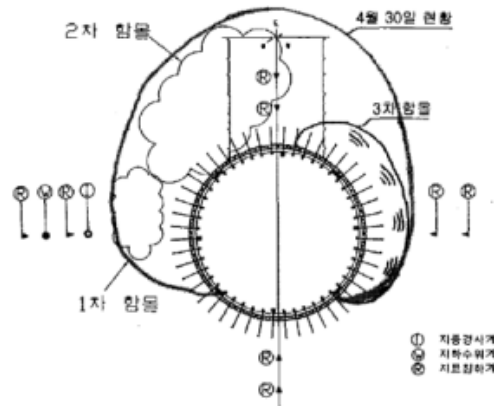
공동구 공사는 도심지 공사이므로 불가피하게 소음, 진동, 도로점용으로 상가피해 등을 유발하며, 지역주민의 집단민원을 빈번하게 발생시키는 문제가 있다. 광주 OO 수직구 공사(에너지 데일리, 2001)의 경우 계속적인 발파에 의해 기존의 균열 부분이 진전하는 원인으로 집단민원이 제기 되었으며, 서울 OO 공사(강북신문, 2011)의 지하수직구 굴착공사 현장은 도로지반 붕괴 및 건축물 붕괴 위험 등을 우려로 민원이 발생한다.



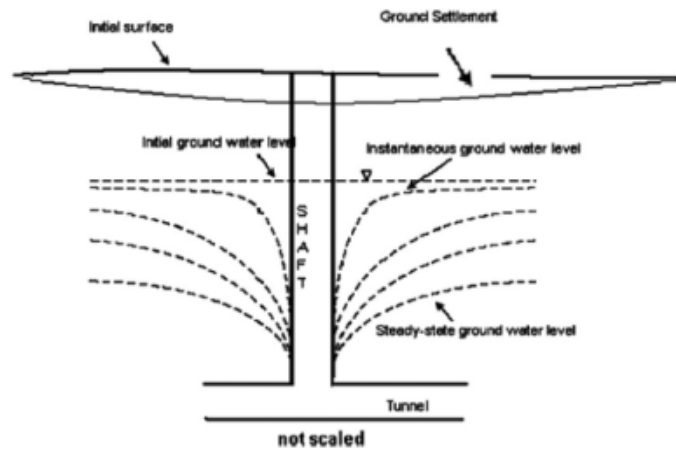
<그림 1.1.11> 터널 발파진동으로 인한 피해(좌측) 및 집단민원 사례(우측)

② 제3-2요소기술 : 공동구용 수직구 하향식 라이닝 현타 급속(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발

본 과제는 공동구용 수직구 하향식 라이닝 현타 급속(1m/day 이상) 시공기술 및 장비를 개발하는 것을 목적으로 한다. 수직구 굴착 중 가장 일반적인 문제는 지하수 문제다. 특히 지하수위가 높은 도심지 충적층 지반에서 굴착중 지하수 유출은 수직구 굴착공정의 시공성을 급격히 떨어뜨리고 지하수위 저하에 따른 광범위한 지반침하와 토립자 유출에 따른 수직구 주변지반의 국부적 지반침하를 유발한다. 특히 지반침하가 완료되지 않은 상태에서 터널 굴진시 추가적인 지반침하로 구조물에 악영향을 줄 수 있다. 인천국제공항철도 OO공구 지표침하, 인천 도시철도 2호선 공사 진행 중 지반침하(20m 함몰, 1명 사망), 경기도 고양 터파기 현장 지반침하(2009) 등은 터널 공사중 지하수위 저하에 의한 대표적인 단기적 지반침하 사례다. 수직구 건설에 의한 지반침하는 서울시 OO 시공현장으로 3차에 걸쳐 1m 깊이 이상의 지반함몰이 발생하였다. 서울지하철 건설 후 지하수위가 평균 15m 하강, 영천 도수터널의 경우 지하수위가 100m 하강, 호남선 목포터널의 영향으로 목포시 지하수 5m 하강 등의 사례가 있다(현윤정 등, 2013). 단기적 지하수위 하강은 주변 구조물에 단기적 피해를 나타내나, 장기적 지하수위 하강은 도시하천의 건천화, 지하수순환체계 교란, 지반침하, 지하수 오염 등 복합적 피해를 유발한다.



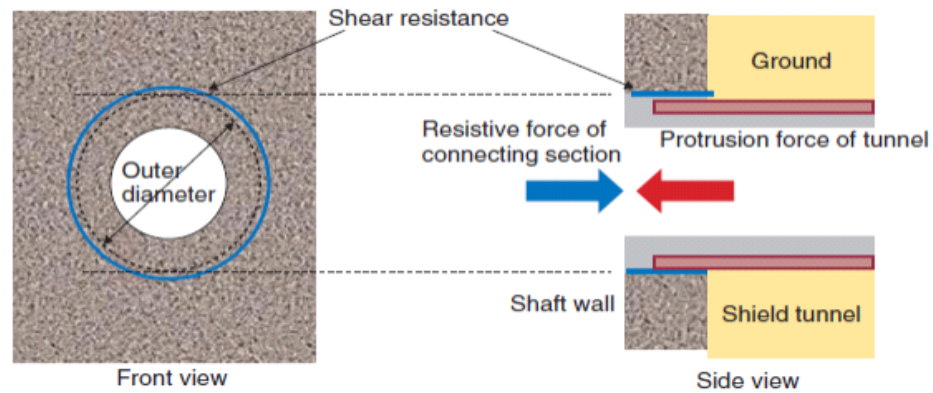
<그림 1.1.12> 굴착중 토립자 유출로 인한 수직구 주변 지반침하(김성욱, 한병원, 2006)



<그림 1.1.13> 수직구 굴착시 지하수 저감으로 인한 수직구 주변 지반침하(Aksoy, 2007)

③ 제3-3요소기술 : 공동구용 수직구 접속부 보강/차수장치(심도 20m 이상) 및 바이오폴리머 차수공법 개발

본 과제는 공동구용 수직구 접속부 보강/차수 장치 및 수직구 보강/차수를 위한 비시멘트 바이오폴리머 차수공법을 개발하는 것을 목적으로 한다. 종래의 터널-수직구 접속부는 주변 지반조건과 구조형식에 따른 경계조건이 상이하여 부등침하의 발생 확률이 매우 높으며, 장기적인 지하수위 저감 등에 따른 지반침하 시 접속부의 손상 가능성이 크다. 특히 지진시 상대변위 발생에 따른 수직구 벽체와 터널 라이닝본체 접속부의 손상이 우려된다.



<그림 1.1.14> 지진시 터널 수직구-터널 접속부 작용력(Yamazaki 등, 2013)

각 요소기술 개발을 통해 기존 수직구 시공 기술의 문제점을 극복하며, 가시설을 배제하여 경제성이 10% 이상 향상되고 공기가 25% 이상 저감되는 새로운 수직구 시공 시스템을 제안한다. 새로운 시공 시스템의 기술적 특징은 다음과 같다:

- ㉠ 라이닝 구조물의 압입을 위한 지반 변위와 지하수 유출을 방지하는 수직구 라이닝 구조물 외주면 급속굴착(1m/day) 굴착 기술 및 장비
- ㉡ 수직구 내부 굴착을 위한 저소음(60dB(A))/무진동 암반지반 급속굴착(1m/day 이상) 시공기술 및 장비
- ㉢ 현장타설 라이닝 구조물을 하향식 급속(1m/day 이상) 압입하기 위한 시공기술 및 장비
- ㉣ 심도 20m 이상 적용 가능한 수직구 접속부 보강/차수 장치
- ㉤ 수직구 보강/차수를 위한 비시멘트 계열(바이오 폴리머)의 투수계수 10^{-8} m/s이하의 바이오 폴리머 수재



<그림 1.1.15> 제안 수직구 시공 시스템의 개요

2. 연구개발의 중요성

도시지는 주로 단독구 또는 관로 위주의 각종 지하매설물이 난립하여 추가시설물 설치에 어려움을 겪고 있으며, 또한 이로 인한 잦은 개착 공사 등으로 인하여 경제적 손실과 함께 많은 민원이 발생한다. 또한 각종 지하매설물의 난립은 관리에 어려움을 불러와 공사 시 가스관 파손 등 큰 재해 위험성을 내포하고 있다. 공동구는 국토 공간내 기반시설과 이의 연결망으로 구성되는 도로, 철도 등 ‘라이프라인’의 일부로 전선로·통신선로·상수도·도시가스 등을 공동 수용하는 통합형 지하 매설물이다. 공동구의 설치는 도시미관의 개선, 자연재해로부터 전력/통신/가스 등의 인프라 네트워크 보호, 그리고 네트워크 운용의 효율성 제고 등 다양한 효과를 거둘 수 있어 그 필요성에 대한 인식이 확산되고 있는 추세다. 특히, 우리나라는 높은 도시화 비율(약 90%)을 가지고 있어 공동구의 설치를 통한 도시의 생활 및 주거환경의 개선은 국민의 삶의 질 향상에 지대한 영향을 끼칠 수 있다.

「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 시행령 개정결과로 대규모 개발사업지 공동구 설치가 의무화 되었다. 공동구에 들어갈 수용시설 범위를 전선로, 통신선로를 포함한 다수의 설비를 의무적으로 수용토록 함에 따라 공동구에 대한 시장은 급격하게 성장 중이다. 또한, 우리나라의 대도시 가공 배전선로 지중화율은 매우 낮은 것을 고려하면(서울 52.4%, 런던·파리 100%, 뉴욕 72.2%, 동경 86.3%) 전선 공동구에 해당되는 소단면의 공동구 시장이 더욱 팽창할 것으로 예상된다. 공동구는 관할지자체를 비롯한 유관기관이 공동구 설치 사업의 주체가 되는 경우가 일반적이다. 또한 공동구는 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」에 의한 주요 국가 기간 시설로서 그 설계 및 시공에 관한 기술은 국민의 생명과 재산을 보호하는 공익적 측면을 갖는 기술이다. 따라서 공동구의 설계 및 시공을 위한 기술 개발은 정부의 정책적·경제적 지원이 없이는 이루어기 어려운 특성이 있으며, 따라서 국가차원의 설계 기술 제정 및 시공 기술 개발이 반드시 필요하다.

이에 대해 구체적으로 기술 개발이 필요한 항목별로 구분하여 검토해보면 다음과 같다.

가. 기술적 측면

공동구 시공 방법은 크게 개착 공법과 굴착에 의한 터널식 공법으로 나뉜다. 국내 공동구 설치 관련 정책 및 시장 전망을 고려하면, 쉴드 TBM 공법에 의한 터널식 공동구가 향후 국내 신규 설치 공동구의 주류가 될 것으로 기대된다. 그러나, 쉴드 TBM을 활용한 공동구 설계 및 시공과 관련한 국내 기술 수준은 현재 선진국 대비 10~70% 수준으로 미흡한 단계에 머물러 있음. 따라서 선진국과의 기술격차를 줄이고 기술 자립을 이루기 위해서는 정부의 적극적인 정책적, 경제적 지원 하에 산-학-연이 공동으로 연구를 수행하여 연구 역량을 집중해야 할 필요가 있다.

<표 1.2.1> 선진국 대비 국내 공동구 설계 기술 수준

기술명	기술수준		
	최고기술평유국	기술수준(%)	기술격차(개월)
글로벌 표준화 설계법 (LRFD) 을 고려한 터널설계	유럽, 미국, 일본	50	72
공동구 설계용량 최적화 연구	일본	78	52
공동구 안전관리기술	싱가폴, 유럽, 일본	70	120

<표 1.2.2> 선진국 대비 국내 공동구 시공기술 기술수준

기술명	기술수준		
	최고기술평유국	기술수준(%)	기술격차(개월)
TBM 굴진성능 예측기술	미국, 노르웨이	50	60
셸드-TBM 추진부 기술	일본	10	120
막장압 및 뒤통압 선정 관련	일본, EU	25	60
공동구 급곡구간 굴착용 셸드-TBM 장비	일본, 독일	10	120

<표 1.2.3> 해외 선진국 대비 국내 수직구 시공기술 기술수준

기술명	기술수준		
	최고기술평유국	기술수준(%)	기술격차(개월)
차수재 및 공법	미국	95	12
저소음/저진동 암반굴착공법	독일, 일본, 미국	80	60
도심지 공동구 수직구 라이닝 급속 /모듈화 시공법	독일	20	36
공동구용 수직구-터널 접속부 보강기술	일본, 미국	50	72

(1) 도심지 터널식 공동구 최적 설계용량산정 및 글로벌 표준화 설계기술 개발

(가) 제1-1요소기술 : 도심지 공동구 수용시설별(3종이상) 설계용량 및 단면 최적화 기술 개발

기존 도심에 공동구 건설시 막대한 예산이 소요되므로, 도심지 공동구 활성화를 위한 비용 분담 및 국가 지원 등에 대한 실질적인 규정이 요구되는 실정이며, 사업시행자와 점용기관이 분담하는 방식에 대한 사업 추진 절차가 필요하다. 터널식 공동구에 수용시설(전력, 통신, 상수도 등)별 상호 영향인자(온도, 원활한 기능 발휘, 유지관리원의 효율성 등)를 고려하

여 수용시설별 최적화된 단면 기술력 확보가 필요하며, 국내의 모든 신도시 공동구는 공동구로 수용이 가능한 생활공급(Life-Line)시설의 대부분을 수용하도록 계획하고 있으나, 기존 도심지는 오랜 기간 각종 공급시설이 무분별하게 개별 매설되었으므로 매설물의 정비를 통한 지하공간 이용효율의 증대가 필요하다. 이를 위해서는 도심지 유형별 평가시스템을 세분화하고 지표별 정량적 평가방법을 설정해서 지표항목에 대한 사회적 요구와 경제적 타당성의 종합평가로서 공동구로 수용하는 것이 효율적인 수용시설의 종류와 규모 등을 설정하는 등 설계용량의 최적화를 연구해야 할 필요가 있다.

소단면 터널식 공동구의 경제성 평가를 위한 비용분석 모델은 기존의 건설 구조물(교량, 터널 등)의 비용평가와는 다르게 공동구 구조물 특성에 맞는 비용분석 모델이 개발되어야 한다. 비용분석 모델은 공동구 경제성 평가 및 공동구 구조물, 수용시설물의 생애주기 차원이 비용 항목을 고려하여 최적설계를 위한 의사결정에 기여할 수 있다. 또한 표준 공정 및 내역 산출 프로그램 개발 연구를 기반으로 현장별 특성을 반영한 도심지 소단면 터널식 공동구 시공에 적합한 공사/공정관리 시스템을 개발하고자 한다. 개발된 공동구 공사/공정관리 시스템을 통하여 공동구 관련 시공 및 설계 기술개발의 시공관리 차원의 최적 공사비/공기 산출 의사결정에 기여하고자 한다.

(나) 제1-2요소기술 : 터널식 공동구의 글로벌 표준화 설계법(LRFD) 개발

세계적 추세인 성능중심의 터널식 공동구 설계·시공이 가능하고, 보다 경제적인 한계상태설계법(LRFD, Load-Resistance Factor Design) 확보 및 기준 반영이 필요하다. 공동구와 같은 지반구조물 설계 시 선진국에서는 한계상태설계법이나 생애주기비용분석 등의 적용으로 최적화 설계하는 것이 추세이므로 설계기술의 글로벌 표준화를 통해 엔지니어링 산업 및 건설분야의 해외진출 확대에 기여하고자 한다.

공동구의 2차원 및 3차원 동적해석 및 내진설계에 이용할 수 있는 다양한 실내 및 실대형 시험을 수행하고 여기서 나온 결과를 내진해석과 내진설계에 적용할 수 있는 기법이 절실히 요구되고 있어, 동적지반물성 DB를 바탕으로 지반응답해석을 실시하여 도심지 지역특성에 맞는 지진시 지반응답 특성자료의 구축 및 분석이 필요하다. 이를 토대로 액상화 재해도를 작성하고 액상화 가능성이 높은 사업구간내에 대해서는 선제적으로 도심지에 적합한 액상화 대책공법을 선정함으로써 지진시 발생가능한 대규모 공동구 피해를 막을 수 있다. 요소기술 개발을 통해 최종적으로 지진에 공동구가 안전하면서도 경제적인 글로벌 표준화 설계법에 기초한 내진설계법을 제안하고자 한다.

(다) 제1-3요소기술 : 도심지 소단면 터널식 공동구 건설단계 (계획·설계·시공)별 안전 위험요인을 고려한 안전관리기술 개발

공동구의 방재와 관련하여 공동구 설치 및 관리지침(2010) 등에서 재난 대응방법을 제시하고 있으나 이는 공동구의 운영 중에 발생하는 재난에 국한되어 있다. 따라서 소단면 터널식

공동구의 건설단계에서 고려해야할 재난발생 방지 기법과 운영 중 발생하는 재난에 대한 대응책을 마련하여 시설물의 전주기(Life cycle)를 고려한 방재기법을 마련하는 것이 중요하다.

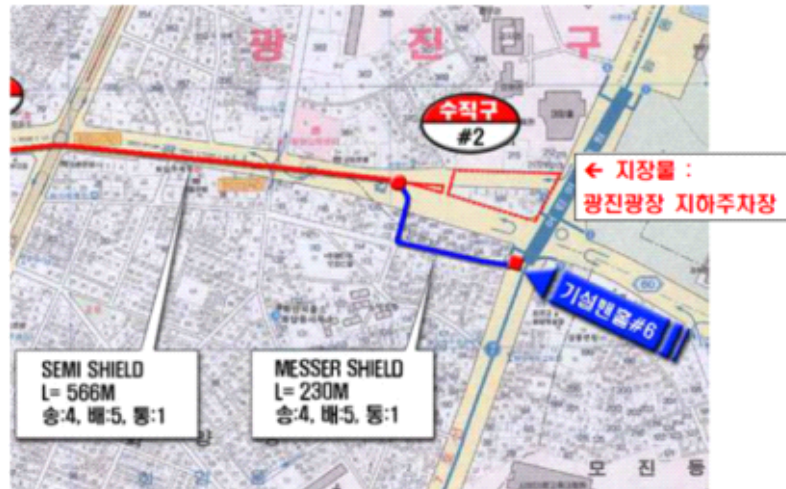
(2) 도심지 소단면 터널식 공동구 굴진율 예측기법과 급곡구간/특수지반 급속 시공기술 개발

(가) 제2-1요소기술 : 쉘드TBM 현장굴진자료 DATA분석을 통한 굴진성능 예측 및 산정 기법 제시

소단면 터널식 공동구에 대한 굴진율 산정기술은 국내 최초로 수행되는 연구로써 방대한 현장 굴진자료 수집 및 통계 분석을 통해 TBM 굴진율 예측기술을 확보하고자 한다. 뿐만 아니라, 과거 사례 바탕으로 국내지반에 적합한 굴진율 및 장비 운전 조건을 제시하여 터널식 공동구의 합리적이고 명확한 설계에 기여하고자 한다. 소단면 터널식 공동구에 대한 실굴진율 산정 프로그램 개발은 국내 최초로 수행되는 연구기술로써 국내의 소단면 쉘드 TBM의 실굴진율 산정 프로그램과 프로그램에 탑재되는 알고리즘을 개발하고자 한다.

(나) 제2-2요소기술 : 소단면 터널식 공동구 급곡구간(R30m 급) 쉘드TBM 추진기술 및 중절장치 개발

지장물 난립으로 급곡구간 시공 필요가 증가하고 있음. 최소 R=60m 시공실적을 넘어서, R30m급 곡률반경에서 시공 가능한 장비개발을 통한 세계적인 쉘드TBM 기술 선진국으로 갈수 있는 교두가 될수 있다. 급곡구간에 적용 가능한 쉘드TBM장비 개발 뿐만 아니라, 시공추진시스템의 개발이 필요함. 급곡구간의 경우 Jacking force의 편심이 작용하여 세그먼트 파손 등의 문제가 발생할 수 있으므로, 시공시 노선오차의 최소화와 세그먼트 안정성을 확보하는 추진기법개발에 대한 연구가 필요하다. 지반-세그먼트-추진구조물 등 상호 연계를 고려하기 위해 소단면 터널식 공동구 급곡구간의 추진으로 인한 세그먼트 라이닝의 파손원인을 분석하고 요구성능을 만족하는 형태의 개선이나 보강을 통해 누수방지, 철근의 부식방지 등으로 내구수명을 확보하고자 한다. 또한, R30m급의 급곡구간용 세그먼트 라이닝의 제작 및 시공기술 개발로 도심지 급곡구간의 계획과 설계에 제한조건을 완화시키는데 기여하고자 한다. 완전 방수터널 개념으로 설계되는 쉘드 TBM터널에서 누수가 발생한다는 것은 기술적으로 후진국임을 나타내는 것이며, 따라서 선진외국과 같이 급곡구간에서도 누수가 발생하지 않는 기술개발은 매우 필요하고 중요하다. 이것은 추후 터널식 공동구 해외시장 개척에서도 반드시 기술적으로 필요한 사항이다.



<그림 1.2.1> 지장물로 인한 선형 변경 (성수분기 전력구)

(다) 제2-3요소기술 : 소단면 터널식 공동구 특수지반/특수조건 쉴드TBM 급속 (downtime 40% 이하) 시공기술 개발

공동구 터널은 비교적 천층에 굴착되어 매립층 및 퇴적층 지층에 통과하는 경우가 많고, 해당 지층 굴착 시 특수지반(호박돌층, 복합이지층)을 조우할 가능성이 크다. 일반 쉴드 TBM 터널 시공시 특수지반(복합이지층, 호박돌, 고수압 등)을 통과할 때 가동휴지시간 발생률은 약 86%에 달하고 있으며, 특히 소단면 공동구의 경우 단면규모가 작아 대응용 부대 시설 미확보로 시공효율성이 급감하고 있다. 특수지반에서는 장비가 재밍(jamming)되거나, 지반보강 작업으로 인한 공사비 및 공기 증가의 문제 발생하고, 여러 종류의 지반이 혼재되어 나타나는 복합지층에서는 장비의 굴착성능이 급격히 저하된다. 호박돌층 통과 트러블은 흔히 발생하는 시공트러블 중 하나로써, 국내에서는 호박돌층을 조우할 때 지반조건에 따라 사례별로 수행되는 트러블슈팅으로 공기지연 및 공사비 증가가 필연적으로 동반되고 있는 실정이다. 따라서, 특수지반에서 공기 및 공사비 증가를 최소화하기 위한 지반보강(TBM 기기 내) 및 최적의 장비 운용조건에 대한 가이드라인이 요구되는 상황이나 현재까지 국내에서 연구진행이 미비하다.

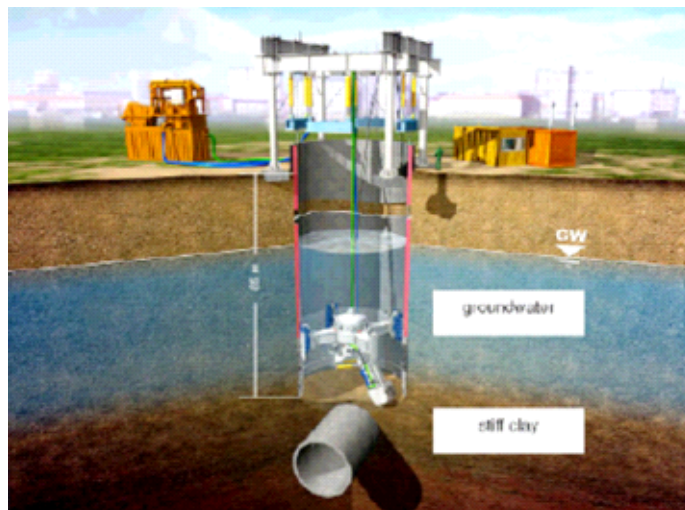
(라) 제2-4요소기술 : 소단면 터널식 공동구 시공기술에 의한 소단면 터널식 공동구 성능 검증 시설 개발

세계 최초로 구축되는 소단면 터널식 공동구 실험대형 성능검증 시설을 통해 실제 현장조건을 모사하여 현장에서 사용되는 쉴드TBM을 이용한 굴착실험을 세계 최초로 할 수 있다. 또한, 실험대형 토조에서의 설계와 동일한 소단면 터널식 공동구 굴착을 통해 소단면 쉴드 TBM 장비의 실험대형 성능검증기법을 개발 할 수 있다. 이를 통해 굴착방법 및 장비제작에 관련된 신기술의 성능을 검증해볼 수 있어 기술적 완성도를 높일 수 있다.

(3) 공동구용 수직구 급속시공을 위한 저소음/무진동 시공시스템, 보강/차수 기술 개발

(가) 제3-1요소기술 : 공동구용 수직구 저소음/무진동 급속굴착(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발

가시설을 배제하며 라이닝 구조물을 시공하는 수직구 시공 시스템의 경우 Herrenknecht의 Vertical Shaft Sinking Machine (VSM)이 대표적이다. 지하수위와 관계없이 기계식 굴착장비를 사용하여 굴착과 동시 세그먼트 라이닝 시공이 가능하며, 최대심도 50m 까지 굴착이 가능하다. 이러한 시공법은 수직구 주변 지반의 교란과 지하수위 변동을 최소화하여 수직구 시공중 안정성을 크게 향상시켰으며, 가시설을 생략하고 기계화 굴착으로 시공속도가 빠른 장점을 가지고 있다.



<그림 1.2.2> 국외의 수직구 시공 시스템

그러나 국외의 수직구 전문 시공장비는 지반 변형/함몰 및 지하수 유출 방지를 위해 수직갱 내부에 슬러리 안정액을 사용하므로 슬라임 처리를 위한 부대장비가 필요하고, 비교적 대형으로 장비가가 고가이다. 아직까지 제한된 수직구 발주 물량, 중저심도 위주의 공사규모 및 공사비의 한계가 있는 우리나라에서는 운용이 어려움. 슬라임 처리 시설까지 포함되는 경우 많은 부지면적이 소요되어(VSM 공법 20 x 30m/기존공법 10 x 20m) 협소한 작업공간의 도심지 공사에 불리하며, 슬라임이 건설폐기물 중 건설오니에 해당 되므로 추가 비용이 발생함. 따라서 굴착시 주변 지반과 지하수 영향을 최소화하여 안정성이 확보되며, 공기와 공사비를 줄이고, 국내의 도심지 현황에 부합하는 수직구 시공 시스템의 개발이 필요하다.

서울과 같은 도심지 지반의 경우 상부 충적층 지반 아래 암반지반이 존재하는 것이 대부분이다. 특히 공동구 시공시 기존 지하시설물을 회피하기 위해 심도가 깊어지는 경향이 있으므로 암반지반에 공동구가 시공될 가능성이 매우 크다. 수직구 굴착시 상부 충적층 지반은 백호 등을 사용하여 굴착하나 하부 암반지반의 경우 굴착공법은 발파공법과 할암기에 의한 기계굴착이다. 그러나 발파공법은 도심지 내에서 발파진동, 소음 등으로 인한 주변 구조물의 피해 및 거주민들의 집단민원으로 인해 도심지 수직구 굴착에 사용하기가 매우 힘든

실정이다. 또한 민원방지를 위해 시공되는 할암기 기계굴착은 여러 작업 단계(천공 - 할암 - 소할 - 상차)에서 별개의 장비로 작업이 수행되므로 작업능률이 떨어져 시공속도가 발파 공법(1m 이상/day)에 비해 매우 느리고(0.3m/day), 공사비가 매우 높아(일반 발파굴착 공법 대비 4~5배) 비효율적이다. 할암공정에서 유발되는 소음과 진동은 기준치 이하로 알려져 있으나, 굴착암의 2차 소할에는 유압브레이커(hydraulic breaker)를 백호우(back hoe)에 장착하여 암석에 직접 치질을 타격하므로 소음과 충격진동이 비교적 커서 기준치를 초과하는 경우가 많고 민원을 유발하여 장기적인 작업에는 부적합하다. 민원을 방지하고, 경제적이며 시공속도가 빠른 도심지 수직구 굴착을 하려면 발파를 배제한 저진동 저소음 공법의 개발이 필요하며, 상대적으로 높은 시공속도(1.0 m/day) 및 경제성을 확보(할암공법 대비 70%) 하는 수직구 굴착공법 개발이 필요하다.



<그림 1.2.3> 발파(좌측) 및 할암기(우측)를 이용한 수직구 굴착

(나) 제3-2요소기술 : 공동구용 수직구 하향식 라이닝 현타 급속(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발

수직구 공사는 흙막이 가설 설치 후 굴착이 완료되면 내부에 콘크리트 라이닝을 타설하는 것이 일반적인 방법이다. 수직구 라이닝 공사는 층별 거푸집 및 동바리를 설치하여 시공하는 단계별 재래식 상승공법과 프리캐스트 콘크리트 세그먼트(PC공법)로 조립하여 시공하는 방법이 국내 및 국외에서 적용하여 사용되고 있으나, PC공법은 시공비 상승과 연결부 누수 및 품질확보에 부족한 문제점이 있다. 따라서 기존 수직구 굴착 전 가설 작업 시간을 최소화하고 굴착과 더불어 수직 구조물을 병행 시공하여 공사기간과 비용을 절감하는 공법 개발이 필요하다. 병행 시공공법은 해외에는 일부 있으나 장비가 고가로써 적용이 어렵고 국내는 아직 기술력이 확보되고 있지 못한 실정이다. 따라서 굴착과 더불어 수직구 지상에서 현장 타설 방식 또는 프리캐스트 벽체 조립 방식으로 선행 시공하여 보다 안정적이며 경제적인 유압 침하 공법을 적용할 필요가 있다. 수직구 가설 설치 후 해체에 따른 가설자재 및 지중 매설용 콘크리트와 파쇄용 폐기물 처리에 따른 비용이 지속적으로 발생되어 친환경적이고 더불어 장기적인 안정성에 문제가 없는 가설 대체용 수직구 라이닝 다운시공 및 병행 굴착공법 개발이 필수적이다.



<그림 1.2.4> 수직구 굴착 및 구조물 시공

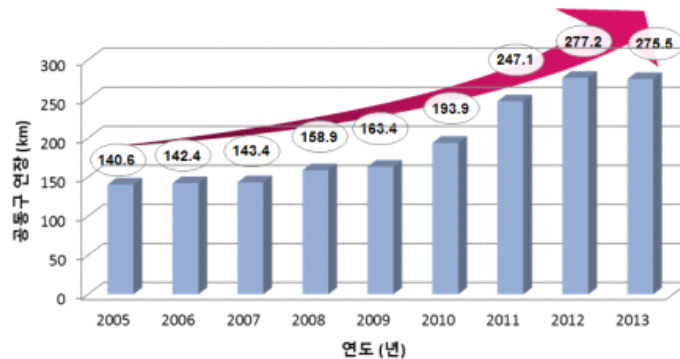
(다) 제3-3요소기술 : 공동구용 수직구 접속부 보강/차수장치(심도 20m 이상) 및 바이오폴리머 차수공법 개발

종래의 공동구-수직구 접속부는 공동구와 수직구의 부등침하, 지진시 상대변위 발생에 따른 접속부의 손상 등으로 누수가 많이 발생하였다. 그러나 지속적인 기술개발이 시행되는 공동구와 수직구 구조물에 비하여 상대적으로 공동구-수직구 접속부에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 2010년 국토해양부에서 제정한 「공동구설계기준」은 공동구와 부대설비에 대하여 지진에 대한 대책으로서 내진설계를 규정하여 내진 1등급의 내진성능을 갖도록 내진 등급과 내진성능 목표를 제시하였다. 따라서 상대강성에 차이로 지진시 손상이 우려되는 공동구-수직구 접속부도 이에 상응하는 대응책이 필요하다. 구조물 특성으로 인한 상대변위로 공동구의 방수성능에 비해 상대적으로 균열과 누수의 발생 확률이 높은 공동구-수직구 접속부의 보강/차수 기술과 지진시 발생변위를 적정하게 흡수함과 동시에 주변 지하수를 차수할 수 있는 터널-수직구 접속부 보강/차수장치의 개발이 시급하다.

도심지 공동구의 경우 깊이 40 m 이상의 대심도에 구축될 가능성이 높아 토압뿐만 아니라 지하수위로 인한 고수압 조건에서 안전성을 확보하기 위한 보강 및 차수공법의 적용이 필수적이다. 기존 지하공간 공사 시 시멘트, 물유리, 우레탄 계열의 재료가 보강·차수재로 널리 사용되고 있으나 급속 고결 성능이 부족하여 높은 수압과 지하수유동에 의해 유실될 우려가 높고, 공기가 길어 경제성이 저하되는 단점이 있다. 아울러 환경 및 지하수 수질 교란 우려가 높아 이를 대체하기 위한 신재료 개발 수요가 최근 증대하고 있다. 이에, 비시멘트 계열 재료로 식용이 가능한 바이오 폴리머를 기반으로 초기 급속 고결 성능이 우수하고 높은 토·수압 조건에서 우수한 차수 성능(투수계수 10^{-8} m/s 이하)을 발휘하는 바이오 폴리머 차수재 개발이 절실하다.

나. 경제·산업·사회적 측면

우리나라 전체 인구 중 도시지역에 거주하는 인구비율은 2005년 이후 약 90% 이상으로 매우 높은 편이며 이러한 추세는 지속될 것으로 추정된다. 이에 따른 사회기반시설 건설 시의 집단 민원, 세종시 등에서의 공동구 설치 의무화, 도시 미관에 대한 욕구 증진 및 인식 변화 등으로 공동구의 설치 연장은 꾸준한 증가세를 나타내고 있다.



<그림 1.2.5> 연도별 공동구 연장 현황

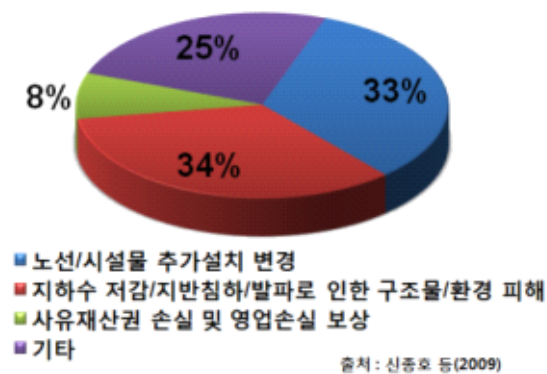
2010년 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 시행령 개정으로 대규모 개발사업 지역에 공동구 설치가 의무화되었다. 또한, 공동구 설계기준에서 수용시설의 범위를 4종에서 2종으로 변경 추진 중에 있다. 현재 공동구는 신도시에서 적용되는 개착식 공동구와 기존 도심지에 적용되는 개착/터널식 단독구가 주류이며, 기존 도심지 민원대책으로 터널식 단독구가 증가 추세이다. 터널식 단독구는 전력구가 가장 큰 시장을 형성하고 있으며, 공동구로 수용될 수 있는 부분이 75%를 차지하여 효율성을 크게 증가시킬 수 있다. 통계청, 한전, 한국감정원 등의 자료를 통해 향후 공동구 건설 수요를 예측해 본 결과 2014년부터 2023년까지 10년간의 공동구 건설시장의 누적규모는 약 6조2천억원인 것으로 추정된다.

보다 장기적으로는 도심지 공동구 수용 용량의 확대에 의하여 단면 직경 6~7m 규모의 선진화 및 대단면화 공동구에 대한 수요가 발생할 수 있으며, 인천 송도 및 새만금과 같은 신도시 개발 (시장규모 4000억원)에 따른 공동구 신규 수요가 증가할 것으로 예상되는 등 본 연구에서 개발될 기술에 대한 잠재적 수요까지 고려하면 본 연구의 경제적 타당성은 충분히 설득력을 지닌다고 판단된다. 소단면 쉘드터널 공사비는 약 800만원/m, 수직구(Φ6~8m) 공사비는 약 3천만원/m 이다. 본 연구는 전체 공동구 공사비의 10% 절감(공동구 터널 80만원/m, 수직구 300만원/m)을 목표로 하고 있다. 따라서 공동구 시장 규모를 고려할 때 본 연구의 성공으로 공사비 10% 절감시 예상되는 절감액은 향후 10년간 약 6,217억원으로 추정된다. 또한, 민원저감, 교통체증 감소, 건설재해 저감효과 등 간접적 비용 추정액 1,866억원을 고려한다면 전체 경제적 효과는 8,083억원으로 추정된다. 한편, 국외 공동구 누적시장 규모는 2019~2023년 사이 2,541,255 억원의 막대한 규모로 추정되고 있다. 본 연구를 통해 우리나라가 세계 최고 수준의 공동구 분야 기술력을 확보한다면, 막대한 국익 창출에 기여할 수 있어 창조경제의 비전에 부합하는 연구 프로젝트가 될 수 있을 것으로 판단된다.

<표 1.2.4>국내 공동구 시장규모 전망

구 분	20014-2018년	2019-2023년																						
누적시장규모 (억원)	28,256	33,907																						
연도별 누적시장규모 (억원)	 <table border="1"><thead><tr><th>연도</th><th>누적시장규모 (억원)</th></tr></thead><tbody><tr><td>2014</td><td>5,651</td></tr><tr><td>2015</td><td>11,302</td></tr><tr><td>2016</td><td>16,954</td></tr><tr><td>2017</td><td>22,605</td></tr><tr><td>2018</td><td>28,256</td></tr><tr><td>2019</td><td>35,037</td></tr><tr><td>2020</td><td>41,819</td></tr><tr><td>2021</td><td>48,600</td></tr><tr><td>2022</td><td>55,382</td></tr><tr><td>2023</td><td>62,163</td></tr></tbody></table>		연도	누적시장규모 (억원)	2014	5,651	2015	11,302	2016	16,954	2017	22,605	2018	28,256	2019	35,037	2020	41,819	2021	48,600	2022	55,382	2023	62,163
연도	누적시장규모 (억원)																							
2014	5,651																							
2015	11,302																							
2016	16,954																							
2017	22,605																							
2018	28,256																							
2019	35,037																							
2020	41,819																							
2021	48,600																							
2022	55,382																							
2023	62,163																							
산출근거	- 공동구 시장은 크게 한국전력 부문과 비(非)한국전력 부문으로 나누어 산정하였음. - 비한국전력 부문은 통계청의 2005-2012년 전체 공동구 건설현황에서 한국전력 부문을 제외한 뒤, 기존 성장추세를 외삽하는 방식으로 산정하였으며(한국전력 부문의 비율설정은 이정일(2011)의 연구결과에 근거하였음), 한국전력 부문은 신규 공동구 건설 수요와 주거환경 개선을 위한 기존 시가지 경과 가공선로의 지중화 수요로 나누어 산정하였음. - 신규공동구 건설 수요는 한국전력의 공동구 사업계획안에 근거, 투자추이를 외삽하는 방식으로 작성하였고, 지중화 수요는 산업자원부의 보고서에 제시된 지중화 최우선 대상선로 공사비를 추정기간에 등분하여 배분하는 방식을 취하였음.																							

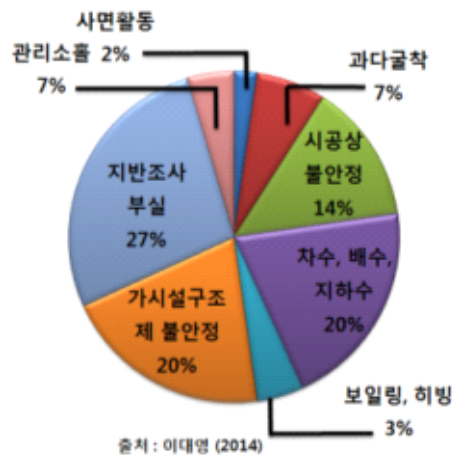
서울지하철 2기 시공중 발생민원 6,219 건 분석 결과, 지하수 저감/지반침하/발파로 인한 구조물/환경 피해가 약 30%로 나타났다. 본 연구에서 도출된 기술들을 활용하여 공동구 시공 중 발생 가능한 구조물/환경 피해를 최소화한다면 전체 민원의 30% 저감이 기대된다.



<그림 1.2.6> 서울지하철 2기 시공중 발생 민원 원인 분석

굴착공사로 인한 지반침하 중 차수, 배수, 지하수로 인한 원인이 약 20%(9건/24건)를 차지한다. 따라서 본 연구에서 도출될 기술을 활용하여 공동구 시공 중 발생 가능한 지하수 등

으로 인한 지반침하를 최소화 한다면 전체 안전재해의 20% 저감이 기대된다.



<그림 1.2.7> 국내 터널 굴착 공사 시 지반침하의 원인 분석

한편, 지하공동구는 화재 등 각종 재난사고 발생 시 국가적 혼란이 예상되는 중요 시설이며, 주요 대테러 방호 시설임. 따라서 2013년 국토교통부는 시트법의 2종 시설물에 공동구를 포함하여 안전관리를 강화한 바 있다. 국토교통부에 의하면 준공 후 30년이 지난 노후화 시설물이 2013년 9.6%에서 2023년 21.5%로 증가 될 것으로 추정됨에 따라 현재의 안전관리체계를 “사고대응 중심”에서 “예방형 유지관리”로 전환하기로 하였다. 본 연구에서는 공동구의 설계 단계에서부터 수용 시설에 따른 안전 관리 기술을 적용하는 기술을 포함하고 있어 향후 건설된 공동구의 안전한 운용에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

(1) 도심지 터널식 공동구 최적 설계용량산정 및 글로벌 표준화 설계기술 개발

(가) 제1-1요소기술 : 도심지 공동구 수용시설별(3종이상) 설계용량 및 단면 최적화 기술 개발

국내 공동구는 모두 신도시 개발사업에 포함되어 건설되었기 때문에 개착 BOX형태를 이루고 있으나 기존 시가지를 대상으로 독자적 공동구를 건설 중인 국외의 경우 터널식 공동구 형태를 주로 채택하고 있다. 기존 시가지 대상 공동구는 신도시 공동구와 달리 복공·가시설 설치로 인한 건설비용의 증가, 장기공사 민원, 주변 건물 침하 우려 등으로 인해 공사여건이 크게 불리하며 공동구의 사회적 요구가 큰 중심가 도심지는 교통량이 많아 장기적으로 차로를 차단하거나 우회 차로 설치가 곤란한 것이 일반적이므로 터널식 공동구 설치가 합리적이다. 도심재생지역의 경우 터널식 공동구를 설치하여 각종 지중매설물을 효율적으로 관리함으로써 경제성을 확보하고 난개발에 따른 민원요인 제거에 기여하고자 한다.

신도시 공동구에는 도시민 생활수준의 향상을 반영한 공급시설(쓰레기수송관, 냉·난방관, 중수관, 각종 통신케이블 등)이 수용되므로 대규모 다실 공간구조로 설치되고 있으나 기존 도심지를 대상으로 하는 경우에는 전력(주로 배전), 상수도, 통신관로가 주로 수용될 가능성

이 높아 소단면 계획이 합리적이다.

도심지에서는 장기간의 건설공사로 인한 차량 통행속도 저하, 도로변 상권 및 보행자 민원 등으로 인해서 기존의 개착식 공동구 보다는 터널식 공동구가 유리하며, 개발사업에 포함되지 않고 공동구를 설치할 경우에 도로를 관리하고 있는 중앙정부와 지방자치단체의 투자비용이 크기 때문에 수용시설의 종류와 규모 등 공동구 설계용량의 최적화가 필요하며 개별 지표항목의 평가방법은 정량적이고 객관적이어야 한다. 관로에 비해 초기 비용이 많이 투입되는 공동구의 설치 계획은 기본적으로 경제성 검토가 수반되어야 하며, 경제성 검토를 위해서는 정성적인 평가 항목을 합리적 수준에서 정량화하여 공동구 설치가 사용주체 및 관리주체 측면에서 발생하는 비용 효과가 정확하게 분석되어야 한다.

공동구가 주로 시공되는 도심지의 경우, 설계 및 시공 기술 구현을 위한 공사/공정관리가 수반되어야 공사 중 민원 저감, 최적 공기 도출, 시공 품질관리, 공사중 안전계획 등과 같은 시공 관리 기술이 적용되어 안전하고 최적화된 공동구 설치 공사가 이루어져야 한다. 국내 소단면 터널식 공동구 건설 기술 수준은 현재 추진 중인 민원저감형 경제적 도심지 소단면 터널식 공동구 프로젝트를 추진하기에는 미흡하여, 해외기술 수입을 고려해야하며, 공동구는 공공재로서의 성격이 강하기 때문에 민간에서는 연구개발에 대한 매력이 떨어져 정부에서 주도적으로 연구개발을 추진해야 할 것으로 판단된다.

(나) 제1-2요소기술 : 터널식 공동구의 글로벌 표준화 설계법(LRFD) 개발

소단면 터널식 공동구의 설계시 기존의 허용응력설계법이나 강도설계법은 불확실성을 단일계수 및 하중계수를 이용하여 과다설계가 되는 사례가 많은 것으로 알려져 있다. 한계상태설계법은 재료가 가지는 내구성이나 최종적인 저항능력을 구조물에 작용하는 하중과의 관계로 평가하고 불확실성에 대한 신뢰성 분석을 기반으로 토목구조물을 설계하는 방법으로 최적화 설계가 가능하므로 비용절감효과가 가능하다. 설계법의 세계적인 추세가 한계상태 설계개념으로 이동하고 있으며, 특히 지반구조물분야는 주변지반특성 및 지하구조물(공동구)의 특성상 아직 한계상태 설계 개념이 정착되지 않고 있으므로, 한계상태 설계기술을 국내 설계법에 도입하여 해외 설계 프로젝트 수주에 있어 경쟁력을 확보할 수 있으며, 선진국의 경우 많은 연구와 실제 적용이 이루어져 공동구의 내진해석 및 내진설계가 외국기술에 의해 이루어지고 있는 실정이다. 관련 산업의 경쟁력 강화를 위해서는 이에 대한 기술력 확보가 필요하다.

(다) 제1-3요소기술 : 도심지 소단면 터널식 공동구 건설단계 (계획·설계·시공)별 안전 위험요인을 고려한 안전관리기술 개발

소단면 터널식 공동구는 주로 구도심지에 건설되기 때문에 안전사고 및 재난 발생 시 사회적·경제적 비용부담이 크며, 공기지연으로 인하여 공사비가 크게 증가할 우려가 있음. 쾌적한 도시환경을 조성하고 민원을 저감하며 국민의 생명과 재산을 보호하기 위해 도심지에

서 진행되는 소단면 터널식 공동구의 건설공사 안전관리 및 건설재해 대응기술 개발이 중요하다. 최근 건설공사의 안전관리 강화를 위하여 건설기술진흥법이 개정되었으며 2020년 3월에 시행되었다. 개정안의 주요 내용 중 하나로 터널의 굴착공사 등 건설공사취약공종에 대하여 위험요인(Hazard Profile)을 작성하여 관리토록 하는 등 안전관리가 강화될 예정이기 때문에, 이에 대비하여 소단면 터널식 공동구의 건설공사에 체계적인 안전관리기법을 선제적으로 도입하는 것이 중요하다.

(2) 도심지 소단면 터널식 공동구 굴진율 예측기법과 급곡구간/특수지반 급속 시공기술 개발

(가) 제2-1요소기술 : 쉘드TBM 현장굴진자료 DATA분석을 통한 굴진성능 예측 및 산정 기법 제시

굴진을 산정기법 개발을 통해 지반조건에 맞는 굴착장비 사용 및 굴진을 설계로 설계변경 축소에 의해 이익을 창출할 수 있다. 굴진율 오차율이 현 상태에서 ($39\% \pm 10\%$)에서 목표치 ($20\% \pm 10\%$)에 도달하면 기대이익은 연간 약 24억 정도이다. 추가적으로, 굴진율 산정 및 예측 기술은 소단면 터널식 공동구가 주로 시공되는 도심지 터널식 공동구의 설계 및 시공기술 향상에 기여하며, 나아가 공기지연 예방에 따른 민원저감, 도로점용기간 축소, 교통혼잡 예방 및 케이블 가압일정 준수에 따른 원활한 전력공급에 기여하는 등 사회적 간접비용의 축소가 예상된다. 또한, 소단면 쉘드 TBM의 실굴진율 산정 프로그램은 설계단계에서 적용 할 수 있으며, 현장에서 얻어지는 데이터를 바탕으로 계속해서 정확도를 향상 시킬 수 있다. 이에 따라 설계 단계와 시공 단계의 연계를 통해 설계 및 시공기술의 수준을 향상시킬 수 있다.

(나) 제2-2요소기술 : 소단면 터널식 공동구 급곡구간(R30m 급) 쉘드TBM 추진기술 및 중절장치 개발

도심지 내 소단면 터널식 공동구 시장은 급격히 증가할 것으로 예상되며, 급곡구간 역시 증가될 예정이다. 급곡구간에 적합한 쉘드TBM 중절장치 개발을 통해 관련 시장에 우위를 차지할 수 있다. 쉘드TBM 추력 및 라이닝 세그먼트의 상호거동을 최대 고려된 추진시스템의 개발로 현실화에 따른 경제적인 쉘드TBM 터널시공이 가능하고 국내기술을 통한 쉘드TBM 추진시스템 개발로 인해 해외기술 의존도 저감이 예상된다. 급곡구간용 세그먼트 라이닝의 보강상세기술 개발을 통해 균열이나 파손, 누수, 내구수명 단축 등으로 이어지는 문제점을 해결하기 위한 유지관리 비용의 절감이 가능함. 급곡구간을 포함한 전력구터널, 통신구터널의 누수구간에 대한 보수 보강은 예상치 않는 공사비를 증가시켜 경제적으로도 반드시 필요한 기술개발이다. 누수의 발생은 공동구 안에 있는 시설물들의 노후화 촉진 및 기능저하를 유발할 수 있고, 따라서 경제적 손실은 물론이고 사회적으로도 민원의 대상이 될 수 있다.

(다) 제2-3요소기술 : 소단면 터널식 공동구 특수지반/특수조건 쉘드TBM 급속
(downtime 40% 이하) 시공기술 개발

특수지반에서 부적합한 대응으로 인해 공기가 증가하고 있고 이로 인해 발생하는 민원문제가 빈번히 발생하고 있다. 또한 부적절한 지반보강으로 인해 자연재해 또한 빈번히 발생하고 있는 실정이다. 특수지반에 대한 적절한 보강 및 급속시공기술의 적용으로 공기를 감소시켜 민원문제 및 자연재해의 저감효과 기대할 수 있다. 공동구 연구단 경제성 분석보고서에 따르면((주)날리지웍스, 2020), 쉘드 TBM 특수지반 시공 시 Downtime 최소화기술 개발로 연간 5%의 공기축소가 기대되고 공사비용 절감액은 2033년까지 연간 1.63억원이 예상된다. 특수지반에서의 공기 및 공사비용 절감으로 교통혼잡비용을 2033년까지 연간 14.54억원, 환경비용을 2033년까지 연간 0.16억원 저감할 수 있을 것으로 판단된다. 종합적으로 본 연구의 성과로 발생하는 비용 절감 편익의 현재가치는 4.07억원으로 분석되었다.

(라) 제2-4요소기술 : 소단면 터널식 공동구 시공기술에 의한 소단면 터널식 공동구 성능
검증 시설 개발

소단면 터널식 공동구 시공기술에 의한 소단면 터널식 공동구 성능검증 시설 개발을 통하여 기존에 제작된 쉘드TBM을 사용할 수 있는 또 다른 지반조건을 찾아내어 현장에 따른 TBM 장비의 제작에 소요되는 비용을 절감시킬 수 있다.

(3) 공동구용 수직구 급속시공을 위한 저소음/무진동 시공시스템, 보강/차수 기술 개발

(가) 제3-1요소기술 : 공동구용 수직구 저소음/무진동 급속굴착(1m/day 이상) 시공기술
및 장비 개발

공동구 공사는 도심지 공사이므로 상가·주택 밀집과 유흥부지 부재로 인해 장비 입·반출 및 운송을 위한 작업공간 확보 시 불가피하게 교통혼잡, 소음, 진동, 도로 점용 등의 문제를 일으키게 되며 이로 인한 지역주민의 집단민원을 빈번하게 발생시키는 문제가 있다. 신중호 등(2009)에 의하면 서울지하철 2기 시공중 발생민원 6,219 건 분석 결과, 노선/시설물 추가 설치 변경 33%, 지하수 저감/지반침하/발파로 인한 구조물/환경 피해가 34%, 사유재산권 손실 및 영업손실 보상이 8%, 기타 25%로 나타난다. 이중 구조물/환경 피해는 저소음/무진동 방식의 수직구 굴착공법이 개발될 경우 그 정도를 크게 낮출 수 있으므로 해당공법의 개발은 매우 중요하다.

(나) 제3-2요소기술 : 공동구용 수직구 하향식 라이닝 현타 급속(1m/day 이상) 시공기술
및 장비 개발

기존 수직구 공사는 굴착 전 수직구의 외주면에 해당하는 지면에서 H형 파일을 타설한 뒤 굴착의 진행에 따라 토류판과 보강재로 구성되는 흙막이 가시설을 추가적으로 설치해나가는 방식으로 계획심도까지 굴착을 완료한 다음 굴착부 벽면에 콘크리트 라이닝을 현장타설 또는 프리캐스트 세그먼트를 조립하여 시공하는 방식으로 수행되어왔다. 이 중 현장타설 방식은 거푸집/동발이 설치 등으로 공정이 증가하고 일정 이상의 양생기간이 필요하므로 공사기간이 증가하는 단점이, 프리캐스트 조립방식은 공사비가 크며 연결부 누수 가능성이 존재한다는 단점을 가진다. 또한 두 방식 모두 굴착과 라이닝 시공이 동시에 수행될 수 없어 전체 공사기간이 늘어나는 단점을 갖고 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 굴착과 라이닝 설치가 동시에 진행될 수 있는 병행시공공법의 적용이 요구되지만, 기존에 해외에서 개발된 병행 시공공법은 시공장비의 가격이 매우 비싸 채용이 어렵다는 문제가 있다. 따라서 기존 병행시공공법의 낮은 경제성을 극복할 수 있는 대체공법 개발의 필요성은 매우 높다.

(다) 제3-3요소기술 : 공동구용 수직구 접속부 보강/차수장치(심도 20m 이상) 및 바이오폴리머 차수공법 개발

상대강성 차이가 있는 공동구용 수직구 접속부의 손상과 장기적인 누수는 주변 지반의 지하수위를 저감시키고 불가피하게 배수량이 증가된다. 지하수위의 장기적 저감은 주변 지반 침하를 통한 사회적 문제를 유발할 가능성이 크며, 누수는 구조물의 열화, 파손의 증가와 함께 직접적인 펌핑 비용의 증가를 통해 유지관리 부담의 증가를 초래한다. 현재 공동구용 수직구 접속부에 특화된 시공기술 공법은 없으므로 본 기술은 터널식 공동구의 설계 및 시공기술 향상에 기여하며, 나아가 수직구 접속부 내구성 향상과 펌핑량 최소화로 유지보수 비용을 최소화할 수 있을 뿐만 아니라 지하수위 저감 방지로 사회적 비용 및 민원 저감이 예상된다.

물유리계 약액은 강알칼리로 국지적 환경피해 유발하며(천병식과 김진춘, 1998), 일본에서는 시멘트 그라우팅서 6가크롬(Cr^{6+}) 검출로(2000.4) 법적 규제가 강화되고 용출시험을 규정한 바 있다. 국내에서도 시멘트 중금속 유해성 논란에 따라 환경부에서는 지속적으로 중금속 함량을 조사 발표하는 실정이다. 또한 그라우팅 주입재는 고수압 및 지하수유동 시 고결 전에 유실되어 보강·차수 효과 저하되며 지하수 오염으로 주변 민원을 유발 할 수 있다. 따라서 급속고결과 유실 최소화에 따른 공기단축, 보강/차수 효과유지와 함께 주변 환경에 전혀 무해한 바이오 폴리머 보강/차수재의 개발이 필요하다. 도심지 공동구 시공 뿐 만 아니라 각종 친환경 지반 보강/차수 분야에 광범위하게 적용하여 건설산업의 환경친화적 이미지 제고와 함께 신 시장 창출로 관련 산업 활성화에 기여가 필요하다.

3. 연구개발 목표 및 내용

가. 연구개발의 최종 목표

(1) 최종 목표

(가) 도심지 터널식 공동구 최적 설계용량산정 및 글로벌 표준화 설계기술 개발

- ① 제1-1요소기술 : 도심지 공동구 수용시설별(3종이상) 설계용량 및 단면 최적화 기술 개발
 - ㉠ 도심지 공동구 수용시설별 설계용량 최적화 연구를 통한 공동구 설치 목적 및 도시 유형에 따라 세분화된 도심지 공동구 설치 타당성 평가시스템 구축
 - ㉡ 지표별 정량적 평가방법과 종합평가에 의한 우선순위 및 공동구 수용량 등의 설계용량 최적화
 - ㉢ 지표별 방대한 기초조사 자료를 정량적으로 평가할 수 있는 타당성 평가 및 설계용량 최적화 프로그램 개발
 - ㉣ 공동구 설치 타당성 B/C분석
 - ㉤ 공동구 구조물/수용시설물 LCC 산정 모델 수립
 - ㉥ 공동구 LCC 최적설계를 위한 경제성 분석 프로그램 개발
 - ㉦ 공사/공정 시스템을 통한 공동구의 적정 공기 및 최적 공사비 산출 모델 수립
 - ㉧ 표준공정/공사비 관리 시스템을 위한 공사/공정 프로그램 개발
- ② 제1-2요소기술 : 터널식 공동구의 글로벌 표준화 설계법(LRFD) 개발
 - ㉠ 터널식 공동구 글로벌 표준화 설계기준 개정(안)
 - ㉡ 터널식 공동구 글로벌 표준화 운영관리 가이드라인
 - ㉢ 한계상태설계법에 의한 터널식 공동구 라이닝 설계 기술 개발
 - ㉣ 글로벌 표준화 설계법 적용을 위한 국내 지반 특성값 평가 기법
 - ㉤ 글로벌 표준화 설계법(LRFD)에 적합한 내진해석법 개발
- ③ 제1-3요소기술 : 도심지 소단면 터널식 공동구 건설단계 (계획·설계·시공)별 안전 위험요인을 고려한 안전관리기술 개발
 - ㉠ 도심지 소단면 터널식 공동구 건설단계(계획·설계·시공)별 및 시공특성을 고려한 안전관리기준 개발
 - ㉡ 도심지 소단면 터널식 공동구 설계안전성검토(DFS)에 활용 가능한 안전관리 매뉴얼 개발
 - ㉢ 도심지 소단면 터널식 공동구 시공 중 대형 건설재해 대응 매뉴얼 개발

(나) 도심지 소단면 터널식 공동구 굴진율 예측기법과 급곡구간/특수지반 급속 시공기술 개발

- ① 제2-1요소기술 : 쉘드TBM 현장굴진자료 DATA분석을 통한 굴진성능 예측 및 산정 기법 제시
 - ㉠ 국내지반 특성에 맞는 쉘드TBM 굴진율 제시 및 장비 선정 가이드 제시
 - ㉡ 국내지반 특성에 맞는 TBM 굴진성능 예측모델 개발 및 설계기준 수립
 - ㉢ TBM 굴진율 예측 프로그램 개발
 - ㉣ 실대형 성능검증 시설을 활용한 테스트베드
- ② 제2-2요소기술 : 소단면 터널식 공동구 급곡구간(R30m 급) 쉘드TBM 추진기술 및 중절장치 개발
 - ㉠ 소단면($\Phi 3.5\text{m}$ 급) 터널식 공동구 급곡구간 (R30m) 쉘드TBM 특수(방향수정) 장치 개발 및 제작
 - ㉡ 국내 지반 특성에 맞는 급곡구간 쉘드 TBM 추진시스템 개발 및 시공가이드라인 제시
 - ㉢ 문헌 및 현장조사를 통한 시공중 파손사례 조사 및 급곡구간 세그먼트라이닝의 요구 검토
 - ㉣ 구조 해석을 통한 세그먼트 라이닝 구조 안정성 검토
 - ㉤ 세그먼트 보강상세기술 개발 및 급곡구간 세그먼트 시공기술 개발
 - ㉥ 급곡구간 세그먼트 시공기술 개발 및 급곡구간 세그먼트 성능실험
 - ㉦ 실대형 실험을 통한 세그먼트 라이닝의 성능 검증
 - ㉧ 급곡구간 지수재 설치 및 채질(성능) 선정 가이드라인 제시
 - ㉨ 실대형 성능검증 및 테스트베드
 - ㉩ 급곡구간 암반여굴 생성을 위한 워터젯 시스템 설계안 제시
- ③ 제2-3요소기술 : 소단면 터널식 공동구 특수지반/특수조건 쉘드TBM 급속 (downtime 40% 이하) 시공기술 개발
 - ㉠ 특수지반 쉘드 TBM의 급속시공 매뉴얼 개발
 - ㉡ 특수지반 조건별 최적 TBM 장비 운용조건 및 후방장비 선정 가이드라인 제안
 - ㉢ 쉘드 TBM 급속시공을 위한 특수지반 보강공법 별 설계기준(안)
 - ㉣ 특수지반용 고성능 디스크커터 및 소재 개발
- ④ 제2-4요소기술 : 소단면 터널식 공동구 시공기술에 의한 소단면 터널식 공동구 성능 검증 시설 개발
 - ㉠ 소단면 쉘드TBM 실대형 성능검증 실험시설 구축을 통한 소단면 쉘드TBM 실대형 성능 검증

(다) 공동구용 수직구 급속시공을 위한 저소음/무진동 시공시스템, 보강/차수 기술 개발

- ① 제3-1요소기술 : 공동구용 수직구 저소음/무진동 급속굴착(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발
- ㉠ 수직구 지반 굴착으로 발생하는 지반변형과 굴착면 내부로 유입되는 지하수 방지
 - ㉡ 1m/day 이상의 빠른 굴착 속도로 토사/암반지반 굴착
 - ㉢ 수직구 내부굴착과 라이닝시공 동시에 수행
 - ㉣ 직경 8m의 원형단면을 굴착하는 세계 최초의 수직구 외주면 선행 급속굴착 장치 개발
 - ㉤ 직경 8m의 원형단면을 굴착하는 세계 최초의 암반지반 굴착 장비 개발 및 시공기술 확보
- ② 제3-2요소기술 : 공동구용 수직구 하향식 라이닝 현타 급속(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발
- ㉠ 수직구 하향식 현장타설 라이닝 급속성형장치 개발
 - ㉡ 라이닝 급속시공을 위한 콘크리트 최적배합 및 시공 매뉴얼 개발
 - ㉢ 수직구 슬래브/계단/접속 개구부 설계 및 매뉴얼 개발
 - ㉣ 수직구-수평터널 연결부 성형장치 설계 및 매뉴얼 개발
- ③ 제3-3요소기술 : 공동구용 수직구 접속부 보강/차수장치(심도 20m 이상) 및 바이오폴리머 차수공법 개발
- ㉠ 공동구용 수직구 접속부 보강/차수장치(심도 20m 이상) 개발
 - ㉡ 차수율 100% 공동구용 수직구 접속부 차수장치 개발
 - ㉢ 상대변위 20mm 수용 가능한 공동구용 수직구 접속부 보강장치 개발

(2) 연차별 연구개발 목표 및 내용

(가) 도심지 터널식 공동구 최적 설계용량산정 및 글로벌 표준화 설계기술 개발

세부과제명	구분 (연도)	주요연구내용
(1-1a 공동) 도심지 공동구 수용시설별 설계용량 최적화 연구 (한국토지주택공사 토지주택연구원)	1차 연도 (2015.11~2016.05)	- 공동구 현황 및 사례에 대한 기초조사
	2차 연도 (2016.06~2017.05)	- 공동구 관련 건설기준 조사 - 수용시설물별 문제점 및 분석
	3차 연도 (2017.06~2018.02)	- 공동구 활성화 방안 기초 조사 - VE/LCC 분석을 통한 공동구 수용시설물의 최적 대안 결정 방법 수행
	4차 연도 (2018.03~2018.12)	- 공동구 활성화 방안 중 지역별 최적 수용시설 항목 분석 - 지역별 터널식 공동구 설치가능 지역 분석
	5차 연도 (2019.01~2019.12)	- 공동구 활성화 방안 중 설치 가능 규모별 검토 - 공동구내 수용시설물 결정을 위한 단위모듈 개발
	6차 연도 (2020.01~2020.05)	- 공동구 설치 예정(서울시)노선을 활용한 통합프로그램 Test-bed 검증
(1-1b 공동) 도심지 터널식 공동구 단면 최적화 설계 기술 개발 (주)대정건설터트)	3차 연도 (2017.06~2018.02)	- 해외 터널식 공동구 적용사례 조사 - 단면 내 수용시설 및 부대시설 배치특성 분석 - 국내외 공동구 단면 설계 및 배치기준 조사 - 기준별 단면설계 항목 비교분석
	4차 연도 (2018.03~2018.12)	- 내공단면 결정을 위한 세부 설계항목 개발 - 수용시설별 설계항목 도출 - 수용시설/용량별 예비단면 작성
	5차 연도 (2019.01~2019.12)	- 터널식 공동구 단면설계 매뉴얼 개발 (시설별 점유공간, 조합수용 기법, 원형단면 배치기법 등 제시) - 수용시설별 / 용량별 터널식 공동구 표준단면도 개발
(1-1c 공동) 도심지 유형별 공동구 설치 타당성 평가시스템 개발 (주)한국종합기술)	2차 연도 (2016.06~2017.05)	- 선행연구 조사 및 분석 - 도심지 유형별 특성 분류 - 타당성 평가시스템의 기초 모델 제시
	3차 연도 (2017.06~2018.02)	- AHP분석 및 타당성 평가모델의 정량적 가중치 설정
	4차 연도 (2018.03~2018.12)	- 지표평가 및 경제성 분석 등을 이용한 정량적 타당성 평가방법
	5차 연도 (2019.01~2019.12)	- 통합프로그램 중 도심지 유형을 고려한 타당성 평가 프로그램 모듈 개발
	6차 연도 (2020.01~2020.05)	- 테스트베드 적용(서울시 주간선도로를 대상으로 프로그램 검증) - 프로그램 모듈의 수정 및 보완

세부과제명	구분 (연도)	주요연구내용
(1-1d 공동) 도심지 터널식 공동구 설치에 위한 LCC 표준공정 및 공사비 관리시스템 개발 (유니콘스㈜)	1차 연도 (2015.11~2016.05)	- 국내외 자료 수집 및 현황조사 - B/C분석을 위한 기초모델 수립
	2차 연도 (2016.06~2017.05)	- 경제성 분석 기초 모델 상세 수립
	3차 연도 (2017.06~2018.02)	- 경제성 분석 통합모델 수립 - 경제성 평가 매뉴얼 개발
	4차 연도 (2018.03~2018.12)	- 공동구 형식별 개략 공사비 산정과 적정 공기 분석 방법 제시 - 공사비/공정 분석 매뉴얼 개발
	5차 연도 (2019.01~2019.12)	- LCC 표준공정 및 공사비 관리시스템 프로그램 개발 - 도심지 특성이 반영된 최적 공사비 및 공기 산출에 대한 단위 모듈 개발
	6차 연도 (2020.01~2020.05)	- 프로그램 검증을 위한 Test-bed
(1-2a 협동) 글로벌 표준화 설계요소기술 개발 및 최적 설계기준 정립 (한국건설기술연구원)	1차 연도 (2015.11~2016.05)	- 국외 설계기준 분석 및 기준 검토 - 한계상태 설계기준 연구방향 확립
	2차 연도 (2016.06~2017.05)	- 재료변수(프리캐스트콘크리트 및 철근)에 대한 통계특성치 분석 및 확률분포곡선 추정 - 하중분포함수 추정을 위한 통계특성치 분석 - 공동구에 적합한 한계상태 방정식의 정의를 위한 기본과정 으로 국내외 한계상태 설계기준 조사 및 쉐드터널의 한계 상태 모형 조사
	3차 연도 (2017.06~2018.02)	- 한계상태방정식의 정의 - 각 설계기준 별 설계수준 목표신뢰도지수 검토
	4차 연도 (2018.03~2018.12)	- 목표신뢰도 지수 제시 - 하중조합에 따른 하중계수 및 저항계수(안) 각각 제시
	5차 연도 (2019.01~2019.12)	- 신뢰성 해석을 통한 최종 목표신뢰도 지수(안) 제시 - 최종 하중/저항계수(안) 제시
	6차 연도 (2020.01~2020.05)	- 터널식 공동구 한계상태설계기준(안) 제시
(1-2b 공동) 한계상태설계법에 의한 소단면 터널식 공동구 라이닝 설계 기술 개발 (㈜평화엔지니어링)	1차 연도 (2015.11~2016.05)	- 국내외 터널식 공동구 라이닝 설계기준 조사 및 비교분석 - 국내외 터널식 공동구 라이닝 설계자료 조사 및 자료수집
	2차 연도 (2016.06~2017.05)	- 기존 설계법과 한계상태설계법 간의 설계법 및 설계항목 비교분석 - 한계상태설계법 적용시 구조설계항목 설계검토
	3차 연도 (2017.06~2018.02)	- 한계상태설계법에 의한 설계 조건별 수치해석에 의한 비교 검토
	4차 연도 (2018.03~2018.12)	- 세그먼트 라이닝의 한계상태설계법에 의한 예비설계 - 실제 강도설계법으로 설계된 세그먼트 라이닝 구조계산 결과와 한계상태설계법에 의한 구조계산 결과비교
	5차 연도 (2019.01~2019.12)	- 터널식 공동구 라이닝의 한계상태설계법에 의한 구조해석 절차정립
	6차 연도 (2020.01~2020.05)	- 터널식 공동구 라이닝의 한계상태설계법에 의한 설계매뉴 얼 제시

세부과제명	구분 (연도)	주요연구내용
(1-2c 공동) 글로벌 표준화설계법 적용을 위한 국내 지반특성값 평가기법 개발 (주)희송지오택)	1차 연도 (2015.11~2016.05)	- 글로벌 표준화 설계법의 지반특성값 및 연구사례 분석 - 문헌조사를 통한 지반특성값 조사 및 설계 사례 수집
	2차 연도 (2016.06~2017.05)	- 글로벌 표준화 설계법 적용을 위한 국내지반 특성값의 통계량 산정 - 해외 터널설계시 지반특성값 평가 사례조사
	3차 연도 (2017.06~2018.02)	- 글로벌표준화설계법 적용을 위한 지반특성값 결정 표준절차 지침 - 글로벌표준화설계법 적용을 위한 지반특성값 결정 프로그램 개발
	4차 연도 (2018.03~2018.12)	- 글로벌표준화설계법 적용을 위한 지반특성값 결정 표준절차 지침 - 글로벌표준화설계법 적용을 위한 지반특성값 결정 프로그램
	5차 연도 (2019.01~2019.12)	- 글로벌표준화설계법 적용을 위한 지반특성값 결정 표준절차 지침 보완 - 표준절차서 및 매뉴얼 제작
(1-2d 공동) 글로벌 표준화 설계법 적용을 위한 내진해석 및 내진설계 기술개발 (주)우성디앤씨)	4차 연도 (2018.03~2018.12)	- 신뢰성분석 및 한계상태설계에 대한 국내외 자료조사 및 분석 - 지중구조물의 기존 내진설계검토 및 한계상태설계에 따른 비교검토 - 지진시 지중구조물의 신뢰성 해석 및 목표 신뢰성지수 검토
	5차 연도 (2019.01~2019.12)	- 구조안전성 및 경제성을 고려한 한계상태기반 터널식 공동구 설계기준(안) (내진설계편) 작성 - 지진시 지중구조물의 신뢰성 해석 및 목표 신뢰도지수 검토 - 지진시 목표신뢰도 지수 해외기준 검토
	6차 연도 (2020.01~2020.05)	- 글로벌표준화 설계법(LSD)에 기초한 내진설계법의 설계기준 검증/보완
(1-3a 공동) 도심지 소단면 터널식 공동구 건설단계별 안전위험요인을 고려한 안전관리기술 개발 (한국시설안전공단)	2차 연도 (2017.04~2017.05)	- 건설안전정보시스템의 취약공종 분석 - 관련법령 및 제도 분석 (국외 선진 건설안전 시스템, 설계 안전성 검토 제도 등)
	3차 연도 (2017.06~2018.02)	- 문헌조사, TBM 터널현장 방문조사, 국외위험요인 자료 조사 등을 통한 안전위험요인발굴 - 전문가 자문, 델파이기법을 활용한 위험요소 분류 및 중요도 파악
	4차 연도 (2018.03~2018.12)	- 공동구 안전 위험요소의 위험성 평가 방법 제시 - 추가 위험요소 도출 및 위험요소의 저감기법 리스트 개발
	5차 연도 (2019.01~2019.12)	- 건설단계별 안전관리 기준 제시 - 설계안전성검토 작성을 위한 매뉴얼(안)
	6차 연도 (2020.01~2020.05)	- 공동구 건설공사 안전관리 업무 매뉴얼 최종본 - 공동구 건설공사 안전관리 업무 매뉴얼 및 건설안전 업무 실용화 - 현장 적용성 평가를 통한 매뉴얼 고도화

세부과제명	구분 (연도)	주요연구내용
(1-3b 공동) 도심지 소단면 터널식 공동구 시공 중 대형건설재해 대응 기술 개발 (인천대학교 산학협력단)	2차 연도 (2017.04~2017.05)	- 시공 중 발생가능 대형재해(침수, 화재 등) 정밀 분석 - 잠재적인 위험요인 분석
	3차 연도 (2017.06~2018.02)	- 대형 건설사고 발생상황별 공동구 재난위기경보 판단기준 마련 - 시공 중 주요 건설재해 시나리오 도출 - 도출된 시나리오별 저감 및 제거방안 마련
	4차 연도 (2018.03~2018.12)	- 시공 중 대형재해 위험요인을 기반으로 건설재해 대응 매뉴얼 초안 작성 - 공청회 및 전문가 자문을 통한 매뉴얼의 실효성 확보
	5차 연도 (2019.01~2019.12)	- 공동구 시공 중 발생 가능한 건설재해 (화재, 침수, 지진) 대응 대책 개발 - 공동구 시공 중 안전관리 기준 및 대형 재해 대응을 위한 매뉴얼(안)
	6차 연도 (2020.01~2020.05)	- 공동구 시공 중 대형 건설재해 대응 매뉴얼 최종본 및 실용화 - 현장 적용성 평가를 통한 매뉴얼 고도화

(나) 도심지 소단면 터널식 공동구 굴진을 예측기법과 급곡구간/특수지반 급속 시공기술 개발

세부과제명	구분 (연도)	주요연구내용
(2-1a 협동) 소단면 터널식 공동구 쉼트TBM의 현장굴진자료 DB구축/굴진을 산정기법 제시 (한국전력공사 전력연구원)	1차 연도 (2015.11~2016.05)	- TBM 굴진에 영향을 주는 지반인자 조사 - TBM 굴진에 영향을 주는 기계인자 조사 - 굴진자료 취득을 위한 현장 조사
	2차 연도 (2016.06~2017.05)	- 지반조건별 굴진을 및 관련영향인자 데이터베이스 구축 - 국내 TBM 장비 특성 조사 - 굴진을 영향인자 상관관계 분석 - 구축DB 카테고리 정립 - 전기비저항을 이용한 암반분류인자 예측
	3차 연도 (2017.06~2018.02)	- TBM 굴진을 데이터베이스 구축 - 지반조건별 굴진을 및 관련 영향인자 데이터베이스 구축 - 굴진을 예측모델제시 - 전기비저항과 지반인자 관계 규명
	4차 연도 (2018.03~2018.12)	- 쉼트TBM 현장별 예측 회귀모델 분석 - 지반조건을 고려한 굴진을 특성 분석 - 지반/기계 DB 확보를 위한 시추공 사이 지반 인자 획득 방안제시
	5차 연도 (2019.01~2019.12)	- 현장데이터 통계분석을 통한 굴진을 분석 및 제시 - 실대형 검증을 통한 굴진을 산정기법 검증 - 국내 지반조건별 최적 장비성능 및 운전조건 제시
	6차 연도 (2020.01~2020.05)	- 지반조건을 고려한 굴진을 산정기법 제시 - 실대형실험을 통한 굴진을 예측 모델 검증

세부과제명	구분 (연도)	주요연구내용
(2-1b 공동) 소단면 쉼트 TBM 복합지반(토사/암반지 반) 실굴진율 예측 모델 및 프로그램 개발 (인하대학교 산학협력단)	1차 연도 (2015.11~2016.05)	- 국내외 연구기관에서 개발된 쉼트 TBM 굴진율 예측기법 조사 - 쉼트 TBM 굴진율 예측 알고리즘 문헌 조사 - 기존의 TBM 굴진율 예측모델의 평가과정 및 방법론에 대한 분석 - TBM 굴진성능 예측모델의 분류체계 제시
	2차 연도 (2016.06~2017.05)	- 상관관계분석을 통한 영향인자 선정 - 다중회귀분석을 적용한 쉼트 TBM 굴진율 예측 모델 분석
	3차 연도 (2017.06~2018.02)	- 회귀분석을 적용한 굴진율 예측 모델 제시 - 다중회귀분석을 적용한 실굴진율 예측 모델의 계수 결정
	4차 연도 (2018.03~2018.12)	- 사용자 기반의 최적화기법을 적용한 쉼트 TBM 실굴진율 예측 모델 프로그램 개발
	5차 연도 (2019.01~2019.12)	- 현장을 통한 쉼트 TBM 실굴진율 예측모델 검증 및 업데이트 - 예측모델 구축 알고리즘 개선 - 현장적용을 통한 성능검증
	6차 연도 (2020.01~2020.05)	- 실험실실험을 통한 쉼트 TBM 굴진율 예측 프로그램 검증 및 업데이트
(2-2a 공동) 공동구(직경 3.5m급) 급곡(R30m) 시공을 위한 급곡 장치 개발 (이엠코리아㈜)	1차 연도 (2015.11~2016.05)	- 국외 제작용업체 방문 정보 조사 - 국내 토질에 맞는 장비 목표 사양 조사 - 초기 장비 목표사양 선정
	2차 연도 (2016.06~2017.05)	- 핵심 부품 제원 분석 및 최적 R30m 급 장비 설계 - 초기 시제품 제작 진행
	3차 연도 (2017.06~2018.02)	- 초기 시제품 제작 진행 - 한전 연구과제 성과물 검증용 EPB Shield 장비 호환 개조 제작 및 조립 - 자체 검증을 통한 성능 평가 - 초기 시제품 성능 평가 후 문제점 보완 수정 제작
	4차 연도 (2018.03~2018.12)	- 한전 연구과제 성과물 검증용 EPB Shield 장비 호환 개조 제작 및 조립 - 자체 2차 검증을 통한 성능 평가 - 급곡 구간 장비 조작 기준 매뉴얼 수립 - 성능 검증시험을 통한 급곡 장치 성능평가
	5차 연도 (2019.01~2019.12)	- 실험실 실험 결과 분석을 통한 장비운용 및 굴진 관리 프로그램 최적화 - 가이드라인 프레임을 이용한 급곡(R30m) 검증방안 도출
	6차 연도 (2020.01~2020.05)	- 실험실 검증을 적용한 장비운영 관리방안 제시
(2-2b 공동) 급곡구간 소형 쉼트TBM 세그먼트 및 굴진 안정을 위한 시공기술 개발 (호서대학교)	1차 연도 (2015.11~2016.05)	- 문헌조사를 통한 급곡구간의 소형 쉼트TBM 현황 문제점 조사 및 분석 - 사례조사를 통한 현장에서 발생할 수 있는 실질적인 문제점 분석
	2차 연도 (2016.06~2017.05)	- 급곡구간 굴착장비 모형 제작 - 모형시뮬레이션을 통한 핵심기술 상호거동모델이론 제시

세부과제명	구분 (연도)	주요연구내용
산학협력단)	3차 연도 (2017.06~2018.02)	- 모형굴착장비 제작 및 실험을 한 상호거동모델(추진력-지반-세그먼트) 이론 검증 및 보완
	4차 연도 (2018.03~2018.12)	- 급곡구간 굴착을 위한 쉘드TBM 축소모형 제작 - 지반 특성별(지층구조패턴별, 급곡구간별) 상호거동에 대한 추진시스템 메커니즘 검증
	5차 연도 (2019.01~2019.12)	- 쉘드TBM 축소모형 제어시스템 구축 및 문제점 보완 - 모형지반을 통한 축소모형 장비 시뮬레이션 실시
	6차 연도 (2020.01~2020.05)	- 쉘드TBM추진기술의 현장 적용을 위한 가이드라인 제시 - 시공 가이드라인 보완 및 검토
(2-2c 공동) 급곡구간 세그먼트 라이닝 기술 개발을 위한 세그먼트 보강상세 및 최적형상 개발 (주)콘택이엔지)	1차 연도 (2015.11~2016.05)	- 문헌 및 현장조사를 통한 시공중 파손사례 조사 - 급곡구간 세그먼트라이닝의 요구 성능검토
	2차 연도 (2016.06~2017.05)	- 급곡구간용 세그먼트 재료기술 개발 - 급곡구간용 세그먼트 최적형상 설계
	3차 연도 (2017.06~2018.02)	- 급곡구간용 하이브리드 세그먼트 형상검토 - 분할수, 폭, 테이퍼량, 연결부 검토
	4차 연도 (2018.03~2018.12)	- 시작품 제작을 위한 거푸집 설계 - 시작품 제작을 통한 프리캐스트 제작 기술 보완
	5차 연도 (2019.01~2019.12)	- FRP Plate 설계 및 제작, 금형설계 및 제작 - 급곡구간용 FRP Plate 세그먼트 조립 및 시공성 검토를 위한 세그먼트 체결방식 결정 - FRP Plate 휨/추력 성능실험
	6차 연도 (2020.01~2020.05)	- 세그먼트 조립 및 시공매뉴얼(안) - 세그먼트 경제성 분석
(2-2d 공동) 지수재 최적화를 통한 급곡구간 이음부 방수시스템 및 시공기술 개발 (건국대학교 산학협력단)	1차 연도 (2015.11~2016.05)	- 해외 급곡구간 지수재 사용 현황 파악 및 분석 - 해외 급곡구간 지수재 설치방안 현황 파악 및 분석
	2차 연도 (2016.06~2017.05)	- 국내 및 해외 급곡구간 세그먼트 이음부 설계기술 현황 파악 및 분석 - 급곡구간 이음부 누수 현황 및 개선방향 분석 - 세그먼트 이음부 지수재 설치방안 개발
	3차 연도 (2017.06~2018.02)	- 급곡구간에서 수팽창 지수재의 적용성 분석 - 급곡구간에서 Gasket 적용성 분석 - 급곡구간에서 고정형 gasket의 적용성 분석 - 시공조건에 따른 지수재 선정 가이드라인 제시
	4차 연도 (2018.03~2018.12)	- 국내 및 해외 지수재 방수 성능 실험 장비 분석 - 실험장비 제작 - 2열 배열 수팽창 지수재의 내수압 실험을 통한 새로운 방수체계 성능 평가
	5차 연도 (2019.01~2019.12)	- 2열 배열 가스켓 및 수팽창 지수재의 내수압 실험을 통한 방수성능 평가
	6차 연도 (2020.01~2020.05)	- 새로운 방수성능 시험장비 제작 - 실험을 통한 급곡구간 일면 방수시스템 검증

세부과제명	구분 (연도)	주요연구내용
(2-2e 공동) 위터젯을 이용한 급곡구간 여굴생성 기술개발 (부산대학교 산학협력단)	2차 연도 (2016.06~2017.05)	- 급곡구간 암반여굴 생성을 위한 위터젯 영향인자 도출 - 카피커터 및 위터젯 시스템 특성, 암반여굴 생성에 영향을 미치는 주요 위터젯 인자 및 주요 암반물성 조사
	3차 연도 (2017.06~2018.02)	- 위터젯 영향인자에 따른 암반 최대 여굴량 성능 및 상관관계 도출 - 영향인자에 따른 암반여굴 깊이 분석 - 영향인자에 따른 암반최대 여굴량 상관관계 분석
	4차 연도 (2018.03~2018.12)	- 암반의 상태(강도)에 따른 굴착 여굴깊이 확보를 위한 최적 위터젯 변수분석 - 위터젯 시스템 설계를 위한 위터젯 최적변수 결정
	5차 연도 (2019.01~2019.12)	- 급곡구간 암반여굴 생성을 위한 위터젯 시스템 설계안 - 위터젯 변수결정에 필요한 시스템 설계값 제시 - 기술 구성도/순서도 작성
	6차 연도 (2020.01~2020.05)	- 암반지역 급곡구간 적용성 예비검토 - 위터젯 시스템 설계안 보완
(2-3a 공동) 특수지반 분류 및 셸드 TBM 효율적 통과기법 개발 (서울대학교 산학협력단)	2차 연도 (2017.04~2017.05)	- 특수지반의 공학적 분류기법 조사
	3차 연도 (2017.06~2018.02)	- 특수지반의 공학적 분류체계 제안 - 특수지반 시험체에 대한 실물절삭시험(1)
	4차 연도 (2018.03~2018.12)	- 복합지반 및 그라우팅 보강된 호박돌 시험체에 대한 실물절삭시험 - 실물절삭시험을 통한 복합지반 및 호박돌층의 절삭메커니즘 분석 및 절삭성능 평가 - 특수지반 대응형 디스크커터 시작품의 마모성능 평가 - 복합지반의 절삭성능평가를 위한 이론적/수치해석 절삭해석
	5차 연도 (2019.01~2019.12)	- 특수지반(보강된 호박돌층)에 대한 절삭시험 - 특수지반 급속시공 매뉴얼(안)
(2-3b 공동) 특수지반 최적보강 설계기준 및 시방서 제안 (㈜수성엔지니어링)	6차 연도 (2020.01~2020.05)	- 특수지반 셸드 TBM 급속시공 매뉴얼 완성 - 실험대형 성능검증 시설을 통한 개발된 특수지반 셸드 TBM의 급속시공기술의 검증 및 보완
	2차 연도 (2017.04~2017.05)	- 특수지반 셸드 TBM 국내외 설계 사례 및 시공 사례 검토
	3차 연도 (2017.06~2018.02)	- 특수지반 셸드 TBM 통과시 보강공법 적용성 검토 - 국내외 설계 사례 및 시공사례 검토 - 특수지반 별 보강방안 문제점 및 대책 검토
	4차 연도 (2018.03~2018.12)	- 보강사례를 통한 특수지반 통과방안 분석 및 제안 - 특수지반 보강영역 적용사례검토 - 특수지반별 보강영역 검증방안 계획
	5차 연도 (2019.01~2019.12)	- 수치해석을 통한 보강공법 영역제안 및 보강적정성 검토
	6차 연도	- 보강사례 및 수치해석 결과의 종합적인 분석으로 특수지반

세부과제명	구분 (연도)	주요연구내용
	(2020.01~2020.05)	보강방안 수립 - 보강방안, 보강영역 등을 고려한 특수지반 최적 보강설계 매뉴얼 제안
(2-3c 공동) 특수지반 쉘드 TBM 최적운용조건 및 장비산정 기법 개발 (㈜동아지질)	2차 연도 (2017.04~2017.05)	- 국내외 특수지반 설계 시공자료 수집
	3차 연도 (2017.06~2018.02)	- 국내외 특수지반을 통과/굴착한 쉘드 TBM의 설계 및 시공자료 수집 및 분석 - 국내외 TBM현장에서 특수지반 통과 시 장비운용/설계 변경사례 조사
	4차 연도 (2018.03~2018.12)	- 특수지반 조건별 최적 쉘드 TBM 장비 선정(안) 제안 - 특수지반에서의 쉘드 TBM 최적 운용조건 제안
	5차 연도 (2019.01~2019.12)	- 특수지반 쉘드 TBM 최적장비 선정(안) 제안 - 소단면 공동구 쉘드 TBM Probe drill 개발
	6차 연도 (2020.01~2020.05)	- 특수지반 조건별 쉘드TBM의 최적운용조건/장비선정 제안 - 소단면 공동구 쉘드 TBM Probe drill 개발품 성능검증
(2-3d 공동) 특수지반용 고성능 디스크커터 개발 (㈜진성티씨)	2차 연도 (2017.04~2017.05)	- 특수지반용 디스크 커터의 국내외 기술 동향 조사
	3차 연도 (2017.06~2018.02)	- 특수지반용 디스크커터 링의 신소재 설계 및 디스크커터 내부구조 설계 검토 - 해외 우수 커터링 성분 조사 - 특수지반에 적합한 성능 검토 - 특수지반용 커터링 금속성분 설계 - 해외 우수 디스크커터 내부구조 조사 - 플로팅 쉘 및 베어링 비교 분석
	4차 연도 (2018.03~2018.12)	- 신소재를 활용한 특수지반용 디스크 커터 링 제작 - 커터 링의 경도/마모/충격성능 평가 - 플로팅 쉘의 최적성능 구현(오링 개발)
	5차 연도 (2019.01~2019.12)	- 특수지반용 디스크 커터 시제품 제작 - LCM 시험용 디스크커터 제작
	6차 연도 (2020.01~2020.05)	- 특수지반용 디스크커터 시제품 실대형/현장적용 검증 - 성능검증 결과에 따른 디스크커터 성능 보완 - 최적의 디스크커터 완성품 제작
(2-4a 공동) 소단면 터널식 공동구 시공기술에 의한 소단면 터널식 공동구 성능 검증 시설 개발 (한국과학기술원)	1차 연도 (2015.11~2016.05)	- 문헌조사를 통한 효과적인 실대형 성능검증 실험시설에 대한 연구 및 기본설계 실시
	2차 연도 (2016.06~2017.05)	- 실대형 성능검증 실험시설 기본설계를 바탕으로 특수지반/특수조건을 구현가능한 실대형 토조 및 선단부 굴진 시험 장비 상세설계
	3차 연도 (2017.06~2018.02)	- 소단면 TBM 실대형 성능검증 시설 설계 및 착공 - 소단면 TBM 선단부 굴진시험 장비설계 - 소단면 TBM 선단부 굴진시험 계획 수립
	4차 연도 (2018.03~2018.12)	- 소단면 TBM 실대형 성능검증 실험동 시공 및 지상 굴진 시험장비 설치

세부과제명	구분 (연도)	주요연구내용
	5차 연도 (2019.01~2019.12)	- 소단면 TBM 굴진시험수행을 통한 시험시설 수정 및 보○ - 공동구센터 실험동 시설 보완 - 소단면 TBM 굴진시험 매뉴얼 개정 - 공동구센터 활용 및 인증방안 제시 - 실험지원동 착공
	6차 연도 (2020.01~2020.05)	- 소단면 터널식 공동구 실대형 성능검증 시설 활용안 추진

(다) 공동구용 수직구 급속시공을 위한 저소음/무진동 시공시스템, 보강/차수 기술 개발

세부과제명	구분 (연도)	주요연구내용
(3-1a 주관) 지반 변위와 지하수 유출을 방지하는 수직구 외주면 급속굴착(1m/day) 기술 및 장비 개발 (한국과학기술원)	1차 연도 (2015.11~2016.05)	- 외주면 굴착장비 최적 설계를 위한 지반 안정성 검토 - 굴착장치 관입깊이-지반별 안정성/차수성 검토 및 최적 관입깊이 장비규모 선정
	2차 연도 (2016.06~2017.05)	- 급속 라이닝 외주면 굴착장비 모형 제작 - 원심모형시험을 통한 외주면 굴착기 부재응력 검토 및 굴착공법 안정성 분석
	3차 연도 (2017.06~2018.02)	- 급속 라이닝 외주면 굴착장비 모형 제작 - 실내 모형시험을 통한 설계 개선 - 수치해석을 통한 원심모형시험 결과 검증 및 사례 연구
	4차 연도 (2018.03~2018.12)	- 급속 라이닝 외주면 굴착장비 및 장비 제어시스템 일부 제작 - 외주면 급속 굴착장비 및 제어시스템 제작 - 외주면 급속 굴착장비 통합 제어용 컨트롤 패널 제작
	5차 연도 (2019.01~2019.12)	- 수직구 외주면 굴착장비 무부하시험을 통한 굴착장비 제어시스템 연동 기술 검증 - 실대형 성능검증시험 수행 - 1개 모듈을 사용한 굴착시험을 통한 굴착속도 목표 확인
	6차 연도 (2020.01~2020.05)	- 실대형 성능검증 시험 결과를 바탕으로 외주면 굴착 장비 수정/보완 수행 - 암반 굴착 장비와의 최적 연계 시공 안 제안 - 급속라이닝외주면 굴착장비/ 제어시스템 제작 완료 (외주면 굴착기 총 2기) - 바이오폴리머 기반 차수재의 동점성, 팽창압, 차수능 상관관계 완성
(3-1d 위탁) 지반 변위와 지하수 유출을 방지하는 수직구 외주면 굴착 장비 개발 (주에이치비씨)	1차 연도 (2015.11~2016.05)	- 외주면 선행 굴착장비설계를 위한 개발방향 분석 - 장비 구성 요소기술도출
	2차 연도 (2016.06~2017.05)	- 급속 라이닝 외주면 굴착장비 및 장비 제어시스템 일부 제작 (프레임, 오거)
	3차 연도 (2017.06~2018.02)	- 급속 라이닝 외주면 굴착장비 및 장비 제어시스템 일부 제작 (오커 및 버킷 시제품)

세부과제명	구분 (연도)	주요연구내용
		- 실대형 외주면 굴착장비 시제품 일부(굴착 모듈) 제작 - 외주면 급속 굴착장비 제어시스템 일부 제작
	4차 연도 (2018.03~2018.12)	- 무부하 시험을 통한 굴착장비 성능 보완 및 제어 시스템 최적화
	5차 연도 (2019.01~2019.12)	- 현 장비 및 제어시스템 활용 시 굴착 시공성 검토를 통해 보완점 도출 및 개선
	6차 연도 (2020.01~2020.05)	- 실대형 성능검증 시험 결과를 바탕으로 외주면 굴착장비 성능 검증 및 수정/보완사항 검토
(3-1b 공동) 저소음/무진동 암반지반 급속굴착(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발 (주제영이앤씨)	1차 연도 (2015.11~2016.05)	- 장비 설계를 위한 개념 정립 - 저소음/무진동 암반 굴착 최적기술 선정 - 저소음/무진동 굴착장비 설계도 제작
	2차 연도 (2016.06~2017.05)	- 실내시험에 의한 최적 굴착 기준 도출(천공부) - 저소음/무진동 암반 굴착 천공부 핵심 단위요소 설계 및 제작 - 실내시험을 통한 최적 천공부 굴착 방법/기술 도출
	3차 연도 (2017.06~2018.02)	- 저소음/무진동 암반 굴착 할암부 핵심 단위요소 제작 - 실내시험을 통한 할암부 최적 굴착 방법/기술 도출
	4차 연도 (2018.03~2018.12)	- 실내시험에 의한 할암부 최적 굴착기준 도출 - 암반굴착장비 시제품 제작 - 암반굴착장비 제어시스템 구성
	5차 연도 (2019.01~2019.12)	- 시제품 실대형 성능검증 (60dB, 무진동) - 실내시험에 의한 시제품 검증 및 보완
	6차 연도 (2020.01~2020.05)	- 테스트베드 현장시험 - 굴착공법 보완 - 굴착공법 매뉴얼
(3-2a 공동) 공동구용 수직구 하향식 라이닝 현타 급속(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발 (주네오시티)	2차 연도 (2016.06~2017.05)	- 공동구용 수직구 하향식 라이닝 시공사례 조사/분석
	3차 연도 (2017.06~2018.02)	- 수직구 하향식 급속성형장치 설계 및 부분제작 - 수직구 구조물 슬래브/계단/접속 개구부 설계 및 매뉴얼 개발 - 수직구-수평터널 연결부 성형장치 설계 및 부분제작
	4차 연도 (2018.03~2018.12)	- 수직구 하향식 급속성형장치 부분제작 - 콘크리트 최적배합 설계 - 수직구 구조물 슬래브/계단/접속개구부 설계 및 매뉴얼 - 수직구-수평터널 연결부 성형장치 부분제작
	5차 연도 (2019.01~2019.12)	- 급속성형장치 시제품 제작 성능보완 (내경 Ø8.0m 기준 시공속도1m/day) - 수직구 구조물 슬래브/계단/접속 개구부 설계 - 수직구 PC중공형 현타 성형장치 제작 (내경 8.0m 기준) - 수직구-수평터널 연결부 성형장치 부분제작
	6차 연도 (2020.01~2020.05)	- 테스트 베드 적용 시험시공을 통한 성능평가
(3-3a 공동)	1차 연도	- 지하구조물 집합부 처리 공법 조사 및 특성분석

세부과제명	구분 (연도)	주요연구내용
공동구용 수직구 접속부 보강/차수 장치 개발 (주)세니츠코퍼레이션)	1차 연도 (2015.11~2016.05)	- 구조물 상대변위 영향인자 조사
	2차 연도 (2016.06~2017.05)	- 직경별/시공심도별 상대변위 분석 - 터널-수직구 접속부 차수장치 설계 - 터널-수직구 접속부 차수장치 목업 제작 및 시제품 구성
	3차 연도 (2017.06~2018.02)	- 차수장치 시제품 제작을 위한 설계보완 - 차수장치 시제품 구조검토, 최종 설계도면 작성
	4차 연도 (2018.03~2018.12)	- 차수장치 상세설계 보완 - 실증시험 및 테스트베드용 차수장치 시제품 제작
	5차 연도 (2019.01~2019.12)	- 시제품 실험 성능검증 - 상대변위 흡수율 및 차수율 검토 - 접속부 차수장치 매뉴얼
	6차 연도 (2020.01~2020.05)	- 테스트베드 적용을 통한 접속부 차수장치 성능 검토
(3-3b 위탁) 공동구용 수직구 접속부 보강/차수 장치 개발 (UNSW)	3차 연도 (2017.06~2018.02)	- 바이오폴리머 재료의 물성 및 유동학적 특성 개선 - 바이오폴리머 차수재 지반 보강/차수 성능 및 거동 특성 평가
	4차 연도 (2018.03~2018.12)	- 바이오폴리머 차수재 성능 검증 - 고안된 구속 차수 장비를 이용한 바이오 차수재 성능 검증 - 바이오폴리머 차수재 차수 성능 검증 및 최적 조건 도출
	5차 연도 (2019.01~2019.12)	- 바이오폴리머 슬러리의 주입 성능 및 거동 특성(차수성능) 평가 - 바이오폴리머 처리 지반-구조물 간 마찰 특성 파악

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 국내 관련 분야의 기술 개발 현황

가. 1세부: 도심지 터널식 공동구 최적 설계용량산정 및 글로벌 표준화 설계기술 개발

<표 2.1.1> 1세부 국내 관련 분야의 기술 개발 현황

구 분	내 용
기술현황	- 개발사업에 포함되지 않고 공동구를 설치할 경우에 도로를 관리하고 있는 중앙정부와 지방자치단체의 투자비용이 크기 때문에 수용시설의 종류와 규모 등 공동구 설계용량의 최적화가 필요함. - 공동구 설계기준(국토교통부, 2010)은 개착식 공동구를 기반으로 한 공동구 내공단면 배치기준을 수록하고 있으나, 쉼터공법을 적용한 터널식 공동구 단면계획시 준용할 수 있는 원형단면내 배치기준은 전무한 실정이며, 또한 쉼터터널식 공동구 표준단면도 개발이 필요한 실정임. - 국내 공동구의 경제성 평가와 관련된 연구는 “공동구 활성화방안 연구”이후로 소수의 연구가 이루어 있고, 최근 전력연구원의 “LCC 기반 전력구 통합수명 관리시스템”을 제외하면 관련 연구가 전무한 실정임. - 글로벌 표준화 설계법(LRFD)에 관한 국내기술은 아직 초기단계이며, 특히 지반분야의 경우는 학술적인 차원에 머무르고 있음. - 터널라이닝 설계에 한계상태설계법 도입을 위한 연구가 필요한 시점으로, 소단면 터널식 공동구에 적용을 위한 연구 착수가 시급함.
시장현황	- 공동구 시장 규모는 향후 10년간 총 6조2,163억원으로 추정되고 있으며, 본 연구의 성공으로 공사비 10% 절감시 예상되는 절감액은 향후 10년간 약 6,217억원으로 추정되고, 민원저감, 교통체증 감소, 건설해해 저감효과 등 간접적 비용 추정액 1,866억원을 고려한다면 전체 경제적 효과는 8,083억원으로 추정됨.
경쟁기관현황	- 국내의 경우, 기존 공동구는 도시개발사업과 더불어 수행된 개착식 공동구가 대부분이기 때문에, 기존 도심지 구간에 경제성과 민원성을 고려한 공동구 적용을 위해서는 소단면 터널식 공동구 적용이 반드시 필요하며, 이에 따른 국내 기존 도심지에 공동구 설치에 대한 소단면 터널식 공동구 시장이 형성되어 있음. - 한국전력공사의 경우 1980년대부터 전력구 건설을 시작해 2015년 현재 전력구의 규모는 약 600km로 해를 거듭할수록 건설 수요가 증가하고 있는 추세이고, 국가 차원의 공동구 설치 계획을 수립하여 주요 도심지에 공동구 설치에 하므로 특별한 경쟁은 없음. “한국시설안전공단”은 국내 공동구 관련 건설기준 제정 및 통합정보, 활용기술 개발에 관한 연구를 수행하고 있음.

구 분	내 용
지식재산권현황	- 국내 공동구는 주로 개발사업에 포함된 신도시 공동구 위주로 연구되었으므로 도심지를 대상으로 공동구를 설치하기 위한 타당성 평가시스템 및 설계용량 최적화 등에 대한 관련 국내 지식재산권(특허 등)은 별도로 없음. - 소단면 터널식 공동구의 LCC 프로그램과 관련된 특허기술은 없는 상태임. 다만, LCC를 기반으로 하는 전력구의 통합 수명 관리시스템 기술이 가장 근접한 기술임.
표준화현황	- 국내 공동구의 설계용량, LCC 시스템 및 표준공정 공사비 관리시스템은 표준화가 이루어지지 않아 현장 조건에 맞춘 의사결정만 있는 실정임. - 2010년에 국토해양부에서 발간한 공동구 설계기준이 있지만 개착형의 경우에만 표준화 되어 있음.

(1) 국내 기술현황

- ① 제1-1요소기술 : 도심지 공동구 수용시설별(3종이상) 설계용량 및 단면 최적화 기술 개발
 - ㉠ 도시계획적인 측면과 관리주체에 의한 도로관리 차원에서 필요성이 대두되고 있는 설계용량 최적화를 위한 의사결정 알고리즘이 필요함.
 - ㉡ 터널식 공동구 원형단면의 공간배치 효율을 극대화한 수용시설별 표준단면도 개발이 필요함.
 - ㉢ 도심지 공동구 설치의 계획, 설계, 유지관리 측면에서 필요한 B/C분석, 수용시설물 LCC분석과 도심지 공동구 공사시 공사비/공정에 대한 관리 시스템이 필요함.
- ② 제1-2요소기술: 터널식 공동구의 글로벌 표준화 설계법(LRFD) 개발
 - ㉠ 도로교설계기준(한계상태설계법)이 제정되어, 2012년부터 유예기간을 두어, 2015년부터 적용이 시작되었으며 교량구조물뿐만 아니라 지하구조물에도 설계기준이 요구되는 시점임.
 - ㉡ 세계적 추세인 성능중심의 터널식 공동구 설계·시공이 가능하고, 보다 경제적인 지하구조물의 세그먼트 라이닝 한계상태설계법(LRFD, Load-Resistance Factor Design) 확보 및 기준 반영이 학계에서 연구하고 있으며, 적용성에 있어서는 미미한 실정임.
 - ㉢ 교량구조물의 경우 도로교설계기준(한계상태설계법)이 제정되어 2015년부터 도로교량부터 적용이 시작되고 있으나, 터널분야는 국외설계법을 학술적으로 검토하는 단계임.
 - ㉣ 건설시장의 개방화에 따른 설계기준의 국제 표준화 필요함에 따라 국제표준화기구(ISO)에서 요구하는 신뢰도기반이며 한계상태설계법이어야 한다는 규정을 만족할 필요가 있음. 국내의 경우 일부구조물(교량, 항만, 철도 등)의 설계기준에만 한계상태설계를 실시하고 터널식 공동구에 대해서는 적용하지 않음.

③ 제1-3요소기술: 도심지 터널식 공동구 전주기 및 수용시설별 안전관리기술 개발

- ㉠ 현재까지 건설안전은 시공현장 위주의 인적안전에 초점을 맞춰 왔지만 계속된 건설 사고로 인해 시공뿐만이 아닌 계획, 설계, 시공 단계별 안전위험을 고려한 안전관리 기술이 필요함.
- ㉡ 현재의 건설안전은 일반적인 건설현장의 위험성 평가에만 그치고 있어 각 공종별 세부적인 건설현장의 위험성 평가가 필요함.
- ㉢ 도심지 소단면 공동구의 특성상 수많은 지장물로 인하여, 급곡부 계획 및 시공이 증대됨에 따라 급곡부의 세그먼트 라이닝 파손으로 인한 누수 등의 안전문제 발생에 대한 대응이 필요함.

(2) 국내 시장현황

① 제1-1요소기술 : 도심지 공동구 수용시설별(3종이상) 설계용량 및 단면 최적화 기술 개발

- ㉠ 도로관리 측면의 기존 도심지 정비를 위한 도심지 공동구 설치에 대한 요구가 높아지고 있는 실정임.
- ㉡ 정보통신을 기반으로 공공기능을 네트워크화한 “스마트시티”, 차세대 지능형 전력망 “스마트 그리드”, 고효율의 물관리 인프라 시스템 “스마트 워터 그리드”등 도심지 공동구를 필요로 하는 창조적 융합기술의 대두.
- ㉢ 설계용량 최적화에 맞춘 LCC, 공사비, 공정에 대한 기술적 요구가 높아지고 있는 실정임.

② 제1-2요소기술: 터널식 공동구의 글로벌 표준화 설계법(LRFD) 개발

- ㉠ 설계법의 세계적인 추세가 한계상태 설계개념으로 이동하고 있으며 국내의 경우 TBM 연구에 관련하여 수행되었으며, 해외건설시장의 경우 발주시 신뢰성기반의 설계법들을 요구함.
- ㉡ 공동구를 포함하여 지하구조물 설계에 있어서도 기존에 적용하고 있는 허용응력설계 및 극한강도설계법은 경제적인 설계의 한계로 한계상태설계법 도입에 관심이 집중되고 있음.
- ㉢ 국내의 학계의 경우 TBM 연구에 관련하여 수행되었으며, 터널설계를 위한 지반정수 평가기법보다는 지반정수들의 플랫폼(지하공간 통합지도)을 만들어 데이터를 구축하고 있음.
- ㉣ 국내에서도 공동구를 포함하여 지하구조물 설계에 있어서 성능중심의 한계상태설계법에 대해 관심을 갖기 시작함.

③ 제1-3요소기술: 도심지 터널식 공동구 전주기 및 수용시설별 안전관리기술 개발

- ㉠ 터널식 공동구 공사시 급곡, 급속, 수직 굴착과 같은 고난이도 공종이 수반되며 이에 따른 안전관리기술 개발이 필요하여 관련 시장의 주목을 요하고 있음.

- ㉞ 기존의 안전관리비를 활용한 관리중심의 산업에서 4차 산업혁명으로 건설현장 안전 관리강화를 위한 안전관리기술 개발이 필요하여 관련 시장의 주목을 요하고 있음.
- ㉟ 소단면 터널식 공동구는 지중에 긴 연장으로 시공되기 때문에 화재 및 침수 등의 재난에 더욱 취약한 구조를 보이고 있지만, 건설공사 시 발생하는 재난 예방·대비·대응·복구에 대한 구체적인 대책이 미흡하여 관련 시장의 주목을 요하고 있음.

(3) 국내 경쟁기관현황

- ① 제1-1요소기술 : 도심지 공동구 수용시설별(3종이상) 설계용량 및 단면 최적화 기술 개발
 - ㉞ 국내의 경우 신도시의 공동구를 제외한 기존 도심지의 설계용량 최적화 연구는 서울시 및 강남구의 타당성 조사가 대표적이고, 그 외의 추가적 연구가 미비함.
 - ㉞ 신도시 공동구는 계획된 모든 공급시설을 공동구 내로 수용하는 것을 전제로 하고 있으나 기존 도심지를 대상으로 공동구를 설치할 경우에는 무분별하게 매설된 각종 공급시설의 타당성 평가 등을 활용해서 실시하는 등의 설계용량 최적화를 통해 수용해야 함.
 - ㉟ 국내의 경우 설계용량 최적화에 맞춘 LCC 시스템 및 표준공정 공사비 관리시스템은 연구가 미비함.
- ② 제1-2요소기술: 터널식 공동구의 글로벌 표준화 설계법(LRFD) 개발
 - ㉞ 일반적으로 설계기준 및 설계요소기술 개발 등은 국가기준센터 및 국가기관 주도로 수행함으로 경쟁기관은 없으며, 한국시설안전공단에서도 비슷한 연구를 수행하며, 업무는 주로 유지관리 측면에서 접근하고 있음.
 - ㉞ 국내 설계업체들의 경우 선진국(해외의 ARUP)의 경우 많은 연구와 실제 적용이 이루어져, 이를 세그먼트 라이닝 설계에 벤치마킹 함.
 - ㉟ 지반정수의 평가기법은 주로 경험적으로 유사 지반을 근거로 하며 평가하고 있으며, 앞서 언급한 바와 같이, 터널설계를 위한 지반정수 평가기법보다는 지반정수들의 플랫폼(지하공간 통합지도)을 만들어 데이터를 구축하고 있음.
 - ㉟ 국내의 경우 교량, 항만, 철도 등에 대해서 각 기관의 필요에 맞게 한계상태설계기준을 가지고 있으나 터널식 공동구에 관련한 한계상태설계기준은 전무함. 따라서 필요시 국외의 한계상태 설계기준을 적용하여 사용 중임.
- ③ 제1-3요소기술: 도심지 터널식 공동구 전주기 및 수용시설별 안전관리기술 개발
 - ㉞ 안전보건공단에서는 인적 중심의 안전관리 기술이 도입되고 있으며, 한국시설안전공단에서는 물적, 기술적 안전관리 기술을 도입함.
 - ㉞ 국토교통부 건설안전정보시스템(COSMIS)에서 건설현장 및 공종별 사고사례현황을 보면, 터널식 공동구 건설도 중요 건설 안전취약공종 중 하나이며 안전 확보를 위해 도심지 터널식 공동구의 특성을 반영한 대형재해 대응 기법이 필요함.

(4) 국내 지식재산권현황

- ① 제1-1요소기술 : 도심지 공동구 수용시설별(3종이상) 설계용량 및 단면 최적화 기술 개발
 - ㉠ 국내의 경우 공동구 설계를 위한 최적화 연구에 대한 기법 특성상 지식재산권은 존재 하지 않음.
 - ㉡ 기존 도심지를 대상으로 수용시설별 설계용량의 최적화를 위한 타당성 평가시스템 등의 별도 지식재산권은 존재하지 않음.
 - ㉢ 공동구 설계를 위한 LCC 및 표준공정 및 공사비 관리 시스템은 지식재산권에 관계 없이 기술적 노하우에 해당하는 기법임. 관련 분석 프로그램 등은 출원이 가능하지만 현재까지 공동구에 관련된 분석 프로그램은 없는 실정임.
- ② 제 1-2요소기술: 터널식 공동구의 글로벌 표준화 설계법(LRFD) 개발
 - ㉠ 국내의 경우 도로교에 한계상태설계법이 적용되었으며, 기준의 특성상 특허는 따로 존재하지 않음.
 - ㉡ 세그먼트 라이닝 설계기준의 경우는 제작회사별 고유의 제작 및 설계 기술을 가지고 있으며 특허는 전무함.
- ③ 제 1-3요소기술: 도심지 터널식 공동구 전주기 및 수용시설별 안전관리기술 개발
 - ㉠ 해당사항 없음.

(5) 국내 표준화현황

- ① 제1-1요소기술 : 도심지 공동구 수용시설별(3종이상) 설계용량 및 단면 최적화 기술 개발
 - ㉠ 국내 공동구의 설계용량 최적화는 표준화가 이루어지지 않았고, 현장 조건에 맞춘 의사결정만 있는 실정임.
 - ㉡ 국내 도심지 유형에 적합한 타당성 평가시스템 등을 활용해서 수용시설별 설계용량 최적화를 구현하는 등 터널식 공동구에 적합한 표준기술이 필요한 상태임.
 - ㉢ 국내 공동구의 LCC 시스템 및 표준공정 공사비 관리 시스템은 공사 조건에 맞춘 분석에 기법으로, 상황 조건별 표준화가 이루어 져야 하지만, 현재까지 표준화되지 않았음.
- ② 제1-2요소기술: 터널식 공동구의 글로벌 표준화 설계법(LRFD) 개발
 - ㉠ 국내 도로교 설계시 2015년부터 한계상태설계법으로 설계를 해야하며, 외국의 경우 신뢰성 기반인 유로코드 및 ASSHTO LRFD 등이 표준화 된 상태임.
 - ㉡ 공동구의 경우 2010년에 국토해양부에서 발간한 공동구설계기준이 있지만, 개착형의 경우에만 표준화 되어 있으며, 터널시공에 관련된 세그먼트에 대한 표준화가 되어 있지만, 설계자의 주관적인 해석에 따라 달라지는 경향이 있음.

- ㉔ 도로교설계기준(한계상태설계법)이 제정되어 2015년부터 도로교량에 적용 중임.
- ㉕ 국내의 경우 일부 구조물(교량, 항만, 철도 등)에 대해서만 표준화 되어있음.
- ㉖ 최근 AASHTO LRFD Road Tunnel Design(2017)이 제정되어 터널구조물에 대한 한계상태설계법이 도입됨.

③ 제1-3요소기술: 도심지 터널식 공동구 전주기 및 수용시설별 안전관리기술 개발

- ㉔ 건설안전에 대한 중요성이 커지면서 설계의 안전성검토(건설기술진흥법 제62조 동법 시행령 제75조의2, 2016년 5월 19일 시행), 지하안전영향평가(지하안전관리에 관한 특별법, 2018년 1월 18일 시행), 안전역량 평가와 같은 건설안전 제도가 도입됨.
- ㉕ 소단면 터널식 공동구의 굴착은 지하철, 지하관로와 같은 기존 지장구조물에 영향을 미칠 수 있으므로 시공 시 공사현장 및 인접시설물의 표준화된 안전관리가 필요함.

(6) 국내 기타현황

① 제1-1요소기술 : 도심지 공동구 수용시설별(3종이상) 설계용량 및 단면 최적화 기술 개발

- ㉔ 기존 도심지 재생 사업 측면과 도로관리 측면의 공동구 설치에 대한 요구가 높아지고 있는 실정임.
- ㉕ 도시의 도시환경 개선사업 등 토지이용 효율을 향상시키고 전기자동차 및 전기충전소의 보급 등 미래 에너지소비 변화에 쉽게 대응할 수 있는 도심지 터널식 공동구의 사회적 요구 증대됨.
- ㉖ 공동구 설계 및 시공을 위한 LCC 시스템 및 표준공정 공사비 관리시스템의 요구가 높아지고 있는 실정임.

② 제 1-2요소기술: 터널식 공동구의 글로벌 표준화 설계법(LRFD) 개발

- ㉔ 글로벌 표준화 설계요소기술 개발을 통한 최적 설계기준의 제정은 구조물의 시공 및 유지 측면에 있어 더 합리적으로 관리할 수 있으며, 국내 동향을 살펴본바 시장성이 충분할 것으로 예측됨.
- ㉕ 공동구 관련 신규 시장은 점진적 개선 방식이 주를 이루는 선진국 중심의 시장과, 장기발전계획에 근거한 선제적 공동구 설치 방식이 주를 이루는 신흥공업국 중심의 시장으로 양분되어 형성될 것으로 예측됨.
- ㉖ 유럽 및 미국등 선진국에서는 기술주도를 위해 한계상태설계법을 정립하고 있음에 따라, 국내에서도 한계상태설계법 정립을 위해 요소기술인 지반정수 평가기법 개발이 절실한 실정임.
- ㉗ 국내 시설물의 설계 및 시공시, 신뢰도 기반의 한계상태설계법의 적용이 점점 요구되어지고 있음.

③ 제 1-3요소기술: 도심지 터널식 공동구 전주기 및 수용시설별 안전관리기술 개발

- ㉔ 해당사항 없음.

나. 2세부: 도심지 소단면 터널식 공동구 굴진을 예측기법과 급곡구간/특수 지반 급속 시공기술 개발

<표 2.1.2> 2세부 국내 관련 분야의 기술 개발 현황

구 분	내 용
기술현황	- 기존 연구결과인 건설기술연구원의 굴진을 산정 및 예측 기술 검토 결과 소단면 일 경우 굴진을 산정 및 예측은 새로이 정의할 필요가 있음. 또한 건설기술연구원의 KICT모델은 TBM을 설계하는데 초점이 맞춰져있어 굴진을 예측문제에 있어서 보수적인 결과가 나오는 것으로 확인되었으며, 암반의 절리상태를 고려할 수 없다는 한계가 있기 때문에 실내실험 위주가 아닌 현장 DB 중심으로 굴진을 산정하고 예측하고자 함 - 급곡선에 적용 가능한 TBM 시공 가이드 및 연구는 미비한 실정. 특히, 세그먼트의 재료 및 설계, 시공에 관한 연구는 전무하며 다량의 누수가 발생에 따른 기술 대책이 미확립 - 현재 급곡구간 굴착 관련하여 연구가 진행되고 있지만 핵심기술의 확보가 미흡함. - 국내 TBM 굴진 연구는 국내 터널 현장이나 수로터널 공사 등의 적용 사례를 이용한 암질별, 구경별 분석한 굴진연구를 수행하였으며, 실험자임의 대로 여러 가지 환경을 모사하는 시험은 연구가 전무한 실정임. - TBM 모사실험간 장비의 기계적인 성능 검증으로서, 1) 굴진률에 관한 연구, 2) 곡선구간에서의 움직임에 관한연구, 현장의 특성의 관한 연구로서, 1) 특수지반에 관한 연구, 2) 복합지반에 관한연구가 모두 현장에서 진행되고 있어 활용하고자 하는 인자를 연구하기에 한계점이 있음. - TBM 굴착 간 전기비저항, 열전도도, 파쇄음을 이용한 전방 탐사기술이 진행되고 있으며, 이러한 기술을 장착한 TBM의 굴착 성능 및 전방탐사기술의 실증 모사에 관한 실험적 연구가 전무함. - 암반지반 시공시 카피커터의 손상 및 작동 불능으로 곡선부 굴진이 불가능하고 공사기간의 연장으로 경제성 감소. 워터젯 시스템을 활용한 암반지반에서의 여굴 생성기술 관련 요소기술은 전무한 현황임. - TBM 세그먼트 라이닝의 재료에 따른 성능향상을 도모한 연구가 지속적으로 이루어지고 있으며, 재료적인 측면에서는 강도증진, 고유동성 재료개발, 두께 및 자중을 줄이는 방향의 연구가 주류임.
시장현황	- 고성능 TBM 추진기술 개발로 인한 공동구 시장 규모가 급속도로 증가할 것으로 예상됨. - 수도권 대심도 광역급행철도(GTX), 서울시 U-SMARTWAY, 신분당선 연장(용산-강남선) 등의 TBM 공사가 진행 예정중에 있으며, 그에 따른 세그먼트 시장이 확대됨. 국내의 경우 대륙공업의 60%로 시장 점유 - 국내의 경우, 일부 터널 굴착 시뮬레이션이나, 실내모형 실험을 통한 커터헤드 개구율에 관한 연구 등이 진행되었으나, 암반지반용 TBM 및 포괄적인 쉘드 TBM 굴착에 따른 굴착성능 및 지반 거동에 관한 연구로 국한되어 있음. -> 아직 성능검증시설의 부재로 시장변화는 없음.

구 분	내 용
	- 국내 공동구 시장에서 지하에 중요설비 및 시공시 불리한 지반을 만났을 때 급곡 구간이 다수 발생할 것으로 보임. 이에 급곡구 시공(암반)에 있어 여굴생성은 필수불가결한 것이며, 관련 기술의 시장은 도시가 성장함에 따라 커질 것으로 기대됨. - 급곡구 TBM시공에 있어 여굴생성은 필수불가결한 것이며, 전세계적으로 공동구 시장이 커짐에 따라 급곡구간 시공시장도 더불어 성장하고 있음. 암반에서 여굴생성이 가능하다면 급곡구간 시장이 더욱 성장할 것으로 기대됨.
경쟁기관 현황	- R=30m 이하의 급곡구간을 극복하기 위한 TBM 추진시스템을 보유한 기관은 전무함. - 기존 TBM 세그먼트 제작업체는 주로 직선구간용, 완곡선 구간용으로 제작 및 판매되고 있으나 급곡구간용 세그먼트 제작기술을 보유한 업체는 없는 실정임. - 대룡공업, 서린실업, 성우산업이 지수재 시장 경쟁 - 기존의 선행되어온 TBM 모사실험 연구의 경우, 최적 절삭조건을 예측하는 실험과 (김상환, 2012) 약 1/40의 비율의 실제 축소모형실험을 통한 TBM 성능 예측하는 실험으로 분할되어 진행되어 왔음 (고성일, 2010). - 국내의 경우, 카피�터 및 워터젯 시스템을 활용한 여굴 생성기술관련 경쟁기관들은 전무함.
지식재산권 현황	- 급곡구간에서 적용가능한 TBM 추진시스템 및 방향조절 장치에 대한 특허는 전무함. - TBM 세그먼트 라이닝 구조형상에 대한 특허는 소수이며, 세그먼트 라이닝의 재료에 관련된 특허가 다수 검색됨. 곡선구간에 적용하거나 급곡구간용 세그먼트 라이닝의 형상 또는 시공기술에 관한 내용은 전무함. - 국내의 경우 급곡구간에 관련된 별다른 특허가 없음 - 축소모형지반을 TBM을 이용하여 굴착하여 실험적으로 분석하는 터널 보어링 머신의 굴착모사 시험 장치에 관한 특허가 존재함(호서대학교 산학협력단). - 국내의 경우, 워터젯 시스템을 활용한 여굴 생성기술관련 지식재산권 아직 존재하지 않음. - 급곡구간의 특수한 상황을 고려한 특허는 존재하지 않음. - 워터젯 시스템을 활용한 암반굴착 특허는 일부 존재하나, 카피�터를 대신하기 위한 암반여굴생성 관련 지식재산권은 존재하지 않음.
표준화현황	- 급곡구간에 대한 상세한 설계기준은 제시되어 있지 않음. - 국내 TBM 세그먼트에 관한 기준은 대부분 외관, 치수 및 재료검사 등이며 성능에 관한 명확한 기준은 제시되어 있지 않음. - 급곡구간 이음부 방수시스템과 관련한 표준화 기준은 현재 국내에 없음. - 소단면 쉘드TBM 성능검증 시설이 전무하여 소단면 쉘드 TBM 성능검증 표준화에 대한 정립이 되어있지 않음. - 국내의 경우, 암반여굴 생성기술관련 표준화는 존재하지 않음. - 연구결과로 도출된 급곡구간 시공방안은 표준화된 평가기준으로 신뢰성을 확보하기 어려움. - 암반여굴 생성기술관련 표준화가 존재하지 않음.

(1) 국내 기술현황

① 제2-1요소기술 : 쉘드TBM 현장굴진자료 DATA분석을 통한 굴진성능 예측 및 산정 기법 제시

- ㉠ 쉘드TBM 굴진율 예측모델 및 산정기법 등을 개발하기 위해서 대표적으로 1) 국내에서는 소규모 암반에 대해 선형절삭실험(LCM)과 회전절삭실험(RCM) 등을 통하여 디스크커터의 특징과 암석의 일축압축강도를 고려한 굴진율 모델을 개발하였음. 그리고 2) 쉘드TBM 현장의 굴진DB를 통하여 통계분석 등을 통한 회귀식을 제안하는 연구가 수행되었음. 그러나, 선형절삭실험의 경우 실제 쉘드TBM의 굴착메커니즘과 암반의 공학적 특성을 반영하기에는 한계가 존재함. 또한, 시추공 지반조사의 한계점으로 인하여 굴진DB 분석 시 정확한 지반조사 정보획득 및 막장압 등의 고려로 인하여 분석에 어려움이 여전히 존재함.
- ㉡ 건설기술연구원(KICT)에서는 2010년부터 2015년까지 TBM 커터헤드 최적 설계기술 및 고성능 디스크커터 개발에 대한 연구과제를 수행하였음. 1) 커터헤드 설계모델 개발을 위한 실물 절삭시험 및 모형 굴착시험을 수행, 2) 커터헤드 개구율/스포크 설계기술, 3) TBM 굴진성능 예측모델 개발, 4) 복합지반용 커터헤드의 커터·비트 상세 배열설계 기술 개발, 5) TBM 최적 커터헤드 설계 시스템 개발, 6) 커터헤드 시작품 제작용 부속설비 구축 등의 연구를 수행 완료함.
- ㉢ 한전 전력연구원(KEPRI)에서는 국내 해저터널 굴진DB를 바탕으로 현장압입지수(FPI)와 비에너지를 바탕으로 소단면 쉘드TBM에 적합한 굴진율 모델을 제안함.
- ㉣ 한전 전력연구원(KEPRI)에서는 소단면 쉘드TBM 굴착 현장의 지반 및 굴진데이터를 수집하고, 상관관계 분석을 통해 굴진율에 미치는 영향을 파악함. 일축압축강도와 절리간격을 고려한 회귀식을 제안함.
- ㉤ 2019년 ○○대학에서는 굴착경이 8.41m의 쉘드TBM 현장의 굴진DB를 분석하고, 디스크커터 당 연직력과 암반의 일축압축강도를 바탕으로 굴착속도 예측모델을 개발함.
- ㉥ 개발하고자 하는 머신러닝 기술은 국내에 존재하지 않는 기술로 본 연구를 통해 신규로 개발되고 있으며, 연구단을 통해 논문 및 특허출원 및 등록되고 있음.

② 제 2-2요소기술 : 소단면 터널식 공동구 급곡구간(R30m 급) 쉘드 TBM 추진기술 및 중절장치 개발

- ㉠ 국내 쉘드 장비에 대한 기술 개발은 전무하며 커터헤드 제작기술개발 및 운전제어 기술개발은 진행 중이며, 쉘드 장비의 급곡 장치에 대한 기술 개발은 본 연구단에서 수행하는 급곡(R30m) 장치가 유일함.
- ㉡ 사다리꼴 형상의 세그먼트를 이용한 곡선시공 연구가 진행되었으나, 배열순서 및 방법이 복잡함. 화재 노출 될 때의 세그먼트의 온도거동 특성에 관한 실험적 연구, 구조해석을 통한 두께에 관한 최적화 연구 등의 콘크리트 재료의 제조 및 제작기술에 관한 연구가 진행되었으나 급곡구간 적용시 세그먼트의 재료 및 설계, 시공에 관한

연구는 전무한 실정임.

- ㉔ EPDM 가스켓 생산 및 기본적인 물성 실험을 수행할 수 있고, 내수압 실험까지 완료 가능함. 또한, 경제성 및 친환경성이 우수한 ANCHOR TYPE 가스켓의 개발 및 시공성능 개선을 위한 연구를 완료함.

③ 제2-3요소기술 : 소단면 터널식 공동구 특수지반/특수조건 쉘드TBM 급속(downtime 40% 이하) 시공기술 개발

- ㉕ 일반 쉘드TBM과 달리 소단면(직경 3.5m 급) 쉘드TBM은 단면 규모 때문에 장비(지반보강, 감압장치, 조 크러셔, 개구부 크기 등) 장착의 한계가 있음. 이로 인해 특수지반/특수조건(호박돌층, 복합지반 등)에서 시공 및 보수보강이 불리하고 민원 및 재해(지반침하, 지하수 유출 등)를 유발함.
- ㉖ 쉘드TBM 시 특수지반을 조우시 현재 대처 방법은 장비의 가동을 중단하고 Trouble shooting식으로 지상에서 그라우팅 등의 공법을 이용하여 지반을 보강하고 재굴진하는 방식이 유일함. 이러한 경우에도 지중 구조물 등으로 인하여 각종 민원을 유발하는 원인이 되고 있음.
- ㉗ 쉘드TBM 시공 시 특수지반에서의 Downtime 발생 현황은 80%이상이며, 일반적인 조건에서 전체 Downtime중 문제 지반에 의한 downtime이 전체 86%를 점유함.
- ㉘ 호박돌층 조우 시 개구율을 줄이고 전방 지반에 대하여 상부 및 좌우 약 2D 이상 영역에 대하여 SGR 그라우팅 공법 등으로 보강하고 재 굴진하는 것이 국내 기술 현황. 이 경우 공기 및 공사비의 증가가 필연적으로 동반됨.
- ㉙ 현재까지 국내에서는 특수지반에서의 시공기술 개발을 위한 연구가 전무한 상태임.
- ㉚ 디스크커터의 대한 기술은 TBM 도입시기의 모방기술에 한정되어 있음.
- ㉛ 암반 굴착하는 커터링에 대한 재질 기술은 표준화된 공구강(냉간, 열간)으로 국한되어 있음.
- ㉜ 커터링에 대한 내마모성 및 내충격성을 요하는 열처리 기술이 연구가 발전되고 있지 않음.

④ 제2-4요소기술 : 소단면 터널식 공동구 시공기술에 의한 소단면 터널식 공동구 성능 검증 시설 개발

- ㉕ 국내 TBM 굴진 연구는 국내 터널 현장이나 수로터널 공사 등의 적용 사례를 이용한 암질별, 구경별 분석한 굴진연구를 수행하였으며, 실험자임의 대로 여러가지 환경을 모사하는 시험은 연구가 전무한 실정임.
- ㉖ TBM 모사실험간 장비의 기계적인 성능 검증으로서, 1) 굴진률에 관한 연구, 2) 곡선구간에서의 움직임에 관한연구, 현장의 특성의 관한 연구로서, 1) 특수지반에 관한 연구, 2) 복합지반에 관한연구가 모두 현장에서 진행되고 있어 활용하고자하는 인자를 연구하기에 한계점이 있음.
- ㉗ TBM 굴착 간 전기비저항, 열 전도도, 파쇄음을 이용한 전방 탐사기술이 진행되고 있으며, 이러한 기술을 장착한 TBM의 굴착 성능 및 전방탐사기술의 실증 모사에 관한 실험적 연구가 전무함.

(2) 국내 시장현황

- ① 제2-1요소기술 : 쉘드TBM 현장굴진자료 DATA분석을 통한 굴진성능 예측 및 산정기법 제시
 - ㉠ 한국전력공사 지중화사업의 한 분야인 터널식 전력구의 증가율은 12년(10km/년)에 비해 두 배 이상(23km/년) 크게 증가하고 있는 추세임.
 - ㉡ 국내 시공기술의 정밀화와 고성능의 추진기술 개발로 쉘드TBM을 이용한 전력구 공사가 지속적으로 증가되면서 굴진율 예측 기술과 관련한 시장규모가 증가할 것으로 예상됨.
 - ㉢ 건설기술연구원(KICT)에 따르면 GTX 공사와 관련하여 예상되는 TBM장비의 시장규모는 1조 4,734억원으로 추정함(시공연장 5km, TBM 장비 비중 10.6% 가정).
- ② 제2-2요소기술 : 소단면 터널식 공동구 급곡구간(R30m 급) 쉘드 TBM 추진기술 및 중절장치 개발
 - ㉠ TBM 적용이 유망한 대도시권 대심도 터널 건설 프로젝트로는 수도권 대심도 광역급행철GTX, 총 연장 147km, 3개 노선, 총 사업비 13조 9천억원 추정)와 서울시의 U-SMARTWAY(총 연장 148.7km, 6개 노선, 총 사업비 11조 2천억원 추정), 신분당선 연장(용산-강남)선 (총 연장 7.49km, 한강하저 통과구간포함, 총 사업비 9천억원 추정)이 예정되어 있음.
 - ㉡ 세그먼트는 쉘드터널의 직접공사비에서 25~40%로 가장 큰 비중을 차지하기 때문에 세그먼트의 비용절감을 위해 국내외에서 이에 대한 연구와 시장이 활발해지고 있음. 특히 공동구의 설치 의무화로 인해 소규모 터널의 시장이 확대 될 것으로 전망됨.
 - ㉢ 국내 TBM 터널 시장규모는 매년 20%정도 성장할 것으로 예상되며 특히, 공동구 터널 관련 현장 규모는 더욱 가파르게 성장할 것으로 예상됨.
- ③ 제 2-3요소기술 : 소단면 터널식 공동구 특수지반/특수조건 쉘드TBM 급속(downtime 40% 이하) 시공기술 개발
 - ㉠ 국내 공동구 건설 시 비교적 천층의 연약지반대를 통과함에 따라 특수지반/특수조건을 조우하는 경우도 증가할 것으로 보임. 관련 기술의 시장은 도시가 성장함에 따라 커질 것으로 기대됨.
- ④ 제2-4요소기술 : 소단면 터널식 공동구 시공기술에 의한 소단면 터널식 공동구 성능 검증 시설 개발
 - ㉠ 국내의 경우, 일부 터널 굴착 시뮬레이션이나, 실내모형 실험을 통한 커터헤드 개구율에 관한 연구 등이 진행되었으나, 암반지반용 TBM 및 포괄적인 쉘드 TBM 굴착에 따른 굴착성능 및 지반 거동에 관한 연구로 국한되어 있음.

(3) 국내 경쟁기관현황

- ① 제2-1요소기술 : 쉘드TBM 현장굴진자료 DATA분석을 통한 굴진성능 예측 및 산정기법 제시
 - ㉔ 쉘드TBM 굴진율 모델은 도출된 방법론과 현장의 지반조건 및 장비의 운전현황 등에 따라 다르게 도출될 수 있기 때문에 경쟁보다는 유사한 환경에서 적절한 모델을 활용하는 것이 무엇보다 중요할 것으로 판단됨.
- ② 제2-2요소기술 : 소단면 터널식 공동구 급곡구간(R30m 급) 쉘드 TBM 추진기술 및 중절장치 개발
 - ㉔ 국내 TBM 제작업체로 등록되어 있는 업체는 이엠코리아(주), 강릉건설 2곳이 유일함.
 - ㉔ 세그먼트 제작은 태명실업, KC산업, IS동서, 삼표 등의 업체에서 활발하게 제작 및 판매하고 있으며, 주로 일반적인 직선구간, 완곡선 구간용으로 국내의 경우 급곡구간 시공 실적이 거의 없으며, 주로 강재 세그먼트를 사용하였음. 급곡구간에 적용하는 RC세그먼트 및 합성세그먼트 제작 기술을 보유한 업체는 없는 실정임.
 - ㉔ EPDM 가스켓 관련 제품을 개발 및 생산하는 대룡공업 외에는 없는 것으로 판단됨.
- ③ 제2-3요소기술 : 소단면 터널식 공동구 특수지반/특수조건 쉘드TBM 급속(downtime 40% 이하) 시공기술 개발
 - ㉔ 저심도 복합 이질층에 적합한 국내 TBM 기술보유 기관으로는 소구경 TBM 요소기술을 보유한 동아지질, 특수건설 등이 있으며, 삼안, 대한콘설턴트 등이 전력구 쉘드 터널 설계 실적을 보유하고 있으나, 선진외국과의 기술격차는 50%이상으로 평가됨.
- ④ 제2-4요소기술 : 소단면 터널식 공동구 시공기술에 의한 소단면 터널식 공동구 성능 검증 시설 개발
 - ㉔ 기존의 선행되어온 TBM 모사실험 연구의 경우, 최적 절삭조건을 예측하는 실험과 (김상환, 2012) 약 1/40의 비율의 실제 축소모형실험을 통한 TBM 성능 예측하는 실험으로 분할되어 진행되어 왔음(고성일, 2010).

(4) 국내 지식재산권현황

- ① 제2-1요소기술 : 쉘드TBM 현장굴진자료 DATA분석을 통한 굴진성능 예측 및 산정기법 제시
 - ㉔ TBM 면판설계 및 굴진성능(암반 및 토사) 예측에 관한 특허가 존재하나, 현장의 평균굴진을 산정과는 거리가 있음.
- ② 제2-2요소기술 : 소단면 터널식 공동구 급곡구간(R30m 급) 쉘드 TBM 추진기술 및 중

절장치 개발

- ㉔ 터널용 세그먼트 라이닝에 구조형상 대한 특허는 소수이며, 세그먼트 라이닝의 재료 (강재, 다공성, 섬유보강콘크리트 등)와 관련된 특허가 다수 검색됨. 이음부에 관해서는 키홈, 볼트너트형식으로 특허가 등록되어 있는 상태임. (주)이엔이테크놀로지는 2007년에 곡면패널라이닝, 곡면패널라이닝 시공방법, 곡면패널라이닝 제조방법 및 제조장치로 3가지의 특허를 출원했으나, 특이점이 없음. 국내의 특허검색 결과 곡선구간에 적용하거나 급곡구간용 세그먼트 라이닝의 형상 또는 시공기술에 관한 내용은 전무함.
- ㉕ 대룡공업에서 출원한 특허 외에는 오래전 소멸된 상태로 보임(특허명 : TBM 터널용 고수압 지수 가스켓, 보유기관 : 대룡공업(주)).

③ 제2-3요소기술 : 소단면 터널식 공동구 특수지반/특수조건 쉘드TBM 급속(downtime 40% 이하) 시공기술 개발

- ㉔ 현재까지 조사된 특수지반/특수조건에 대한 지식재산권은 없는 상태임.

④ 제2-4요소기술 : 소단면 터널식 공동구 시공기술에 의한 소단면 터널식 공동구 성능 검증 시설 개발

- ㉔ 본 과제 수행 이전에 터널 보어링 머신의 굴착모사 시험 장치에 관한 것으로, 축소 모형지반을 TBM을 이용하여 굴착하여 실험적으로 분석하는 모사장치 특허가 존재함(호서대학교).
- ㉕ 본 연구과제를 통해 한국과학기술원에서 소단면 TBM 실험용 굴진시험 장비 특허를 보유하게 되었음.

(5) 국내 표준화현황

① 제2-1요소기술 : 쉘드TBM 현장굴진자료 DATA분석을 통한 굴진성능 예측 및 산정기법 제시

- ㉔ 소단면 쉘드TBM의 굴진을 산정방법에 대해서는 다양한 암반조건에 따라 상이할 수 있기 때문에 표준화는 아직 정립되지 않았지만 더 많은 현장자료를 바탕으로 검증 작업을 수행하면서 주도적으로 표준화를 진행할 계획임.
- ㉕ 개발하고자 하는 기술은 기존에 없던 기술개발로 표준화 변화에는 해당사항이 없음.

② 제2-2요소기술 : 소단면 터널식 공동구 급곡구간(R30m 급) 쉘드 TBM 추진기술 및 절장치 개발

- ㉔ 국내의 경우 TBM 세그먼트에 관한 기준 및 시방서는 터널시방서, 터널설계기준, 고속도로공사전문시방서로 세그먼트에 관한 내용은 있으나 대부분 외관, 치수 및 재료 검사 등이며 성능에 관한 명확한 기준은 제시되어 있지 않음.
- ㉕ 현재 김포 파주 대구경 터널에 대룡공업 제품이 적용되어 진행 중에 있음.

③ 제2-3요소기술 : 소단면 터널식 공동구 특수지반/특수조건 쉘드TBM 급속(downtime 40% 이하) 시공기술 개발

㉠ 다양한 터널관련 설계기준 및 시방서를 검토한 결과 특수지반/특수조건에 대한 표준화 관련 기술은 없는 것으로 조사됨.

④ 제2-4요소기술 : 소단면 터널식 공동구 시공기술에 의한 소단면 터널식 공동구 성능 검증 시설 개발

㉠ 과제 수행 이전에 TBM 성능을 검증하고 평가하는 표준 시설이 국내에 존재하지 않음.

(6) 국내 기타현황

① 제2-1요소기술 : 쉘드TBM 현장굴진자료 DATA분석을 통한 굴진성능 예측 및 산정기법 제시

㉠ 해당사항 없음.

② 제2-2요소기술 : 소단면 터널식 공동구 급곡구간(R30m 급) 쉘드 TBM 추진기술 및 중절장치 개발

㉠ 해당사항 없음.

③ 제2-3요소기술 : 소단면 터널식 공동구 특수지반/특수조건 쉘드TBM 급속(downtime 40% 이하) 시공기술 개발

㉠ 해당사항 없음.

④ 제2-4요소기술 : 소단면 터널식 공동구 시공기술에 의한 소단면 터널식 공동구 성능 검증 시설 개발

㉠ 해당사항 없음.

다. 3세부: 공동구용 수직구 급속시공을 위한 저소음/무진동 시공시스템, 보강/차수 기술 개발

<표 2.1.3> 3세부 국내 관련 분야의 기술 개발 현황

구 분	내 용
기술현황	- 플랜지 파형강판을 이용한 수직구 시공기술이 최근 국토 교통부로부터 건설 신기술 804호로 지정받은 사례가 있음. 기존 라이닝 시공 및 거푸집이 필요 없다는 장점이 존재하지만, 모듈화된 파형강판을 크레인으로 인양 거치하기 위해서 목표 심도까지 선행 굴착이 필요하며 이에 따라 지반 안정을 위한 가시설이 필요하다는 단점이 있음. (평산에스아이㈜) - 아미노알코올계 첨가제를 함유한 지반차수 및 지반보강용 조성물은 경화속도를 조절하기 위한 지연제로, 해수에 대한 저항성이 커서 안정적인 경화가 이뤄지고와 금속의 부식을 방지시키는 강점을 가진 시공방법이 개발됨. ((주) 아이엔티코리아)
시장현황	- 수도권 서부지역 전기공급시설의 건설이 시급한 가운데 부천시역 내 전력구 수직구 공사가 주민들의 공사반대 민원으로 지연되고 있음. - 현재 서울, 인천지역 수직구 5개소와 1개소는 터널을 정상적으로 추진 중이며 부천시구간은 민원 및 허가취소로 공사 중지된 상태임. - 한국전력 경인건설처는 인천광역시 발전단지에서 생산된 전력을 인천, 부천, 서울 서부지역까지 공급하는 지중 송전선로로 사업비 약 5000억원을 투입하여 2015년 6월부터 2017년 6월 완공을 목표로 부천 4개소 등 터널 수직구 9개소의 총 연장 약 23.4km의 공사를 진행 중임.
경쟁기관현황	- 경쟁기관 조사결과 암반지반 급속굴착 기술과 관련하여 기계화 공법을 찾아볼 수 있었음. 해당 기술은 기존 할암방식을 탈피한 암반파쇄기로 굴삭이에 장착한 기계화 공법으로 개발 기술과 유사함.
지식재산권현황	- 개발 기술 관련 특허정보 조사 결과, 2016년 5월 이후 등록된 지식재산권을 찾아볼 수 있었으며 검토결과 본 연구에서 수행하고 있는 공법과는 연관성이 없음.
표준화현황	- 개발 기술과 관련된 표준 현황의 검토 결과 기준 및 규격에 대한 현황 변화 내용 없음

(1) 국내 기술현황

- ① 제3-1요소기술 : 공동구용 수직구 저소음/무진동 급속굴착(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발
 - ㉠ 지상에서 조립 모듈화한 수직구용 플랜지 파형강판을 이용하는 수직구 시공기술이 최근 국토교통부로부터 건설신기술 804호로 지정받은 사례가 있음. (평산에스아이㈜)
 - ㉡ 수직구 연결부 모듈간 접합 시공을 위한 플랜지 파형강판을 사용하여 지상에서 수직구 1층(통형벽체, 바닥판, 계단실 등)을 제작 모듈화하여 크레인으로 인양 거치하는 수직구 시공방법으로 안전사고 감소 가능함.
 - ㉢ 모듈화된 수직구용 플랜지 파형강판 인양 설치를 위해 목표 심도까지의 선행 굴착이

요구되며 이에 따라 지반 안정을 위한 가시설이 필요한 단점이 있음.

- ㉔ 수직구 굴착시 기존의 기계굴착공법으로는 경제성 및 공기면에서 효과를 얻을 수 없는 심도 약 20~80m의 중저심도 수직구 건설에 적합한 Stage-cut 공법이 제안된 사례가 있음. 상부공동에서 천공 후 하부에서 발파하여 하부에서 버력을 처리하는 방법으로 작업자의 안전확보 및 경제성이 우수한 장점이 있으나, 발파 및 소음, 실험 연구의 한계로 현장 적용이 어려운 상태임.
- ㉕ 본 연구단에서 개발 중인 공동구용 수직구 저소음/무진동 급속굴착 시공기술 및 장비의 경우, 수직구의 굴착 및 라이닝 시공이 동시에 수행되어 지반 안정을 위한 가시설이 필요하지 않으며 굴착 및 시공 속도가 빠르다는 장점이 플랜지 파형강판을 이용한 수직구 시공과는 다른 시공 이점으로 판단됨.
- ㉖ 발파공해 허용기준을 준수하면서 합리적인 공기 단축이 가능한 대안 굴착공법으로 전자뇌관을 적용한 전단면 전자 데크장약(Deck charge) 발파공법이 제안된 사례가 있음. 허용기준 이내의 진동수준을 준수하고, 기존의 전기 다단발파 공법보다 높은 시공성을 보이지만, 장약 및 결선작업 과정에서 발생하는 누설전류 등의 전기적인 위험요인을 막기 위한 안전한 전자뇌관 사용이 필요한 단점이 있음.
- ㉗ 저소음/저진동 굴착공법은 크게 진동제어발파, 미진동굴착공법, 무진동굴착공법으로 나눌 수 있음. 진동제어발파는 침단 계측장비와 발파공법을 접합시켜 발파지역에 인접되어 있는 구조물 의상태 및 현황을 파악하여 허용 진동치 이내로 발파하는 공법이며, 무진동 굴착공법이란 기계 굴착(Breaker, Dozer)이 곤란한 암반에 기계굴착을 용이하게 하기 위해서 암반에 천공하여 유압, 팽창제등으로 암반에 균열을 발생시키고 대형 Breaker로 파쇄하는 방법으로 엄밀하게 말하면 기계굴착 보조공법을 의미한다. 미진동 발파공법은 진동 및 소음으로 인한 발파공해가 우려되는 지역에서 사용되는 공법으로 발파규모 및 방법을 조정하여 미진동, 미소음 효과가 있다. 이와 같이 대체로 암반굴착은 공법에 따라 구분할 수 있으나 저소음/무진동 굴착공법의 기술변화는 동일한 수준임.

② 제 3-2요소기술 : 공동구용 수직구 하향식 라이닝 현타 급속(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발

- ㉘ 그린개발: 수직구 외경용 철관 매설 케이싱과 내부벽 직경 매설 케이싱을 연결시켜 지상에서 지하 굴착 후 벽체와 바닥구조물을 시공하는 방법 (특징: 시공사례 없음. 철관 매설에 따른 공사비 증가요소, 내부 슬래브 및 계단 연결 구조 없음).

③ 제 3-3요소기술 : 공동구용 수직구 접속부 보강/차수장치(심도 20m 이상) 및 바이오폴리머 차수공법 개발

- ㉙ 개발하고자 하는 기술은 기존에 없던 공법으로 기술현황 변화와 해당 없음

(2) 국내 시장현황

- ① 제3-1요소기술 : 공동구용 수직구 저소음/무진동 급속굴착(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발
 - ㉠ 수도권 서부지역 전기공급시설의 건설이 시급한 가운데 부천지역 내 전력구 수직구 공사가 주민들의 공사반대 민원으로 지연되고 있음.
 - ㉡ 현재 서울, 인천지역 수직구 5개소와 1개소는 터널을 정상적으로 추진 중이며 부천시 구간은 민원 및 허가취소로 공사 중지된 상태임.
 - ㉢ 한국전력 경인건설처는 인천광역시 발전단지에서 생산된 전력을 인천, 부천, 서울서부지역까지 공급하는 지중 송전선로로 사업비 약 5000억원을 투입하여 2015년 6월부터 2017년 6월 완공을 목표로 부천 4개소 등 터널 수직구 9개소의 총 연장 약 23.4km의 공사를 진행 중임.
 - ㉣ 서울시 중구와 종로구 일대 전력소모량 급증에 따른 조치 사업으로 청계천로 지하에 터널형 전력구 설치계획이 확정됨. 총 사업비 134억원이 투입되는 전력구 사업은 세종로변전소와 운니변전소 간 지상송전을 위한 설비로 전력공급능력 확충을 위해 계획되었고, 2020년 준공예정임. 전 구간 터널 공법(semi-shield)로 시행되며 수직구 설치로 인한 보행장애가 없도록 하였음. 또한 친환경적인 공법으로 소음, 진동, 분진 등 건설공해가 적을 것으로 예상됨.
- ② 제3-2요소기술 : 공동구용 수직구 하향식 라이닝 현타 급속(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발
 - ㉠ 국내에서 이루어진 수직구 하향식 라이닝 현타 급속시공기술 및 장비 개발에 관련된 기술현황 변화는 찾아볼 수 없음.
- ③ 제3-3요소기술 : 공동구용 수직구 접속부 보강/차수장치(심도 20m 이상) 및 바이오폴리머 차수공법 개발
 - ㉠ 국내에서 이루어진 수직구 하향식 라이닝 현타 급속시공기술 및 장비 개발에 관련된 기술현황 변화는 찾아볼 수 없음.

(3) 국내 경쟁기관현황

- ① 제3-1요소기술 : 공동구용 수직구 저소음/무진동 급속굴착(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발
 - ㉠ (주)백양이엔지 : 기존 유압 할암방식을 탈피하여 무진동 암반파쇄기를 굴삭기에 장착한 기계화 공법 또한 굴삭기 운전자가 리모콘을 사용하여 직접 파쇄작업을 수행할 수 있기 때문에 보조 인력이 필요 없으며, 암반파쇄 후 브레이커에 의한 별도의 2차 파쇄작업 없이 천공 → 파쇄 → 집토 → 상차의 연속(동시)시공이 가능한 기계화된 무진동·무소음 암반파쇄공법임.

- ㉞ (주)일화건설 : Gel 파쇄 공법 : 겔(Gel) 상태의 액체에 화학반응을 촉진시켜 순간적인 고온, 고압 상태로 전환되면서 발생하는 힘으로 암석이나 암반을 파괴할 수 있기 때문에 비산, 폭음압 등이 없는 매우 안전한 무소음, 무진동 파쇄공법이며, 동시 연결 작업과 다양한 현장조건에서 적용할 수 있는 공법이다. 지하철 4호선 삼선교 구간에서 겔파쇄 공법으로 승인받아 시공한 사례가 있음.

: B.R.S-Lid 공법 : 초대형 암반파쇄기(Big Rock Splitter)에 의한 암파쇄를 구멍마개(Lid)를 이용하여 작업효율을 극대화 시키는 방법을 이용하여 종래의 천공, 파쇄, 버력제거 순으로 반복하던 것을 파쇄하고자 하는 두께만큼 단번에 천공하여 Lid로 천공구멍을 막아놓고, 파쇄 작업과 버력제거 작업만 반복하도록 단순화하여 공기단축 및 원가 절감이 가능한 무진동, 무소음, 무분진 공법으로 다양한 시공사례가 있음.

- ② 제3-2요소기술 : 공동구용 수직구 하향식 라이닝 현타 급속(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발

- ㉞ 국내에서 이루어진 수직구 하향식 라이닝 현타 급속시공기술 및 장비 개발에 관련된 경쟁기관은 찾아볼 수 없음.

- ③ 제3-3요소기술 : 공동구용 수직구 접속부 보강/차수장치(심도 20m 이상) 및 바이오폴리머 차수공법 개발

- ㉞ 국내에서 이루어진 수직구 접속부 보강/차수장치(심도 20m 이상) 및 바이오폴리머 차수공법 개발에 관련된 경쟁기관은 찾아볼 수 없음.

(4) 국내 지식재산권현황

- ① 제3-1요소기술 : 공동구용 수직구 저소음/무진동 급속굴착(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발

- ㉞ 특허정보 검색 사이트인 특허정보넷 키프리스(KIPRIS)(<http://kportal.kipris.or.kr/>)에서 '수직구'를 검색어로 하여 검색한 결과 2차년도 연구 수행 시작일(2016년 6월) 이후 총 4건의 특허가 출원되었으나 본 연구단에서 수행하고 있는 수직구 시공공법과 연관성이 없는 내용임.

- ㉞ 암반굴착 관련 특허출원및등록 건수는 2015년 212건이 추가 출원 및 등록되었으며, 2016년 상반기에 55건 추가 출원 및 등록 됨으로써 특허출원 및 등록비율은 평균 약 50% 감소함.

- ㉞ 특허정보 검색 사이트인 특허정보넷 키프리스(KIPRIS)(<http://kportal.kipris.or.kr/>)에서 '수직구'를 검색어로 하여 검색한 결과 2018년 1월 기준으로 2016년 4월 이후에 총 14건의 특허가 출원되었으나 본 연구단에서 수행하고 있는 수직구 시공공법과 연관성이 있는 특허는 7개임.

- ㉞ 암반굴착 관련 특허출원및등록 건수는 2016년 209건이 추가 출원 및 등록되었으며, 2017년 167건이 출원 및 등록 됨으로써, 특허출원 및 등록비율은 평균 약 20% 감소함.

② 제3-2요소기술 : 공동구용 수직구 하향식 라이닝 현타 급속(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발

㉠ 특허정보 검색 사이트인 특허정보넷 키프리스 (KIPRIS)에서 ‘하향식 라이닝’을 검색어로 하여 검색한 결과, 2017년 04월 중순기준으로 특허실용신안이 27건이 검색되었음. 내용에 따라 구분하면 공법1건, 수직구 굴착 장치2건, 이외 본 연구와 연관성 없는 내용으로 24건이 검색 되었음.

㉡ 국내의 경우 수직구 하향식 라이닝 현타급속 시공기술 및 장비개발의 대한 기술에 관한 내용은 전무함.

③ 제3-3요소기술 : 공동구용 수직구 접속부 보강/차수장치(심도 20m 이상) 및 바이오폴리머 차수공법 개발

㉠ 개발하고자 하는 기술은 1차년도와 당해연도 연구를 통해 독창성과 창의성을 갖추고 특허 출원되었으며, 2016년 5월 이후 등록, 공개된 유사 지식재산권은 없음.

(5) 국내 표준화현황

① 제3-1요소기술 : 공동구용 수직구 저소음/무진동 급속굴착(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발

㉠ 생활소음 규제기준<소음. 진동 관리법 (개정.2010.6.30.)>, 구조물의 손상기준 발파진동 허용치(터널표준시방서,2015,국토교통부)등 소음 및 진동 규제의 기준변화 없음.

② 제3-2요소기술 : 공동구용 수직구 하향식 라이닝 현타 급속(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발

㉠ 수직구 하향식 공법 관련하여 표준화 시방서 및 표준설계 지침이 전혀 없음.

③ 제3-3요소기술 : 공동구용 수직구 접속부 보강/차수장치(심도 20m 이상) 및 바이오폴리머 차수공법 개발

㉠ 개발하고자 하는 기술은 기존에 없던 공법으로 표준화현황 변화와 해당 없음.

(6) 국내 기타현황

① 제3-1요소기술 : 공동구용 수직구 저소음/무진동 급속굴착(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발

㉠ 해당사항 없음.

② 제3-2요소기술 : 공동구용 수직구 하향식 라이닝 현타 급속(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발

㉠ 해당사항 없음.

③ 제3-3요소기술 : 공동구용 수직구 접속부 보강/차수장치(심도 20m 이상) 및 바이오폴리머 차수공법 개발

㉔ 해당사항 없음.

2. 국외 관련 분야의 기술 개발 현황

가. 1세부: 도심지 터널식 공동구 최적 설계용량산정 및 글로벌 표준화 설계기술 개발

<표 2.2.1> 1세부 국외 관련 분야의 기술 개발 현황

구 분	내 용
기술현황	- 유럽, 미국 및 일본의 경우 1980년대부터 다양한 단면형상 및 건설재료를 사용한 도심지 Utility Tunnel의 적용이 이루어져 왔으며, 지하매설관의 공동구내 수용을 통해 도시미관 향상 및 원활한 유지관리가 이루어지고 있음. - 특히, 일본의 경우 공동구 정비 등에 관한 특별조치법에 공동구 사업의 시행 및 공동구 건설에 관한 법적 기반을 확보하고 있음. - 현재 일본과 체코(프라하시)는 기존 도심을 대상으로 공동구가 활발히 건설되고 있는 대표적인 국가로서 모두 1960년대부터 장기적인 Master Plan을 수립함.
시장현황	- 국외 공동구 누적시장 규모는 2019~2023년 사이 2,541,255 억원의 막대한 규모로 추정되고 있음. 본 연구를 통해 우리나라가 세계 최고 수준의 공동구 분야 기술력을 확보한다면, 막대한 국익 창출에 기여할 수 있어 창조경제의 비전에 부합하는 연구 프로젝트가 될 수 있을 것으로 판단됨.
경쟁기관현황	- 국외의 경우, 일본, 유럽 등 다수의 국가에서 공동구를 적용하고 있으며, 국내와 유사한 기존 도심지에 공동구 적용시 소단면 터널식 공동구 적용이 필요할 것으로 판단됨. - 국외에서의 공동구 건설사업을 포함한 지중화 사업은 주로 자연재해로 인한 단전사고의 저감, 도시미관의 향상 등을 목표로 수행되고 있으며, 세계 지중화 시장은 초기투자비가 많이 소요되는 지중화 사업의 특성 상 기반시설에 대한 신규 수요가 많지 않고 지중화에 따른 투자비를 국가와 민간이 부담할 수 있는 능력을 갖춘 국가들, 즉 경제발전 단계가 높은 수준에 도달한 선진국 중심으로 형성되어 있는 상황임.
지식재산권현황	- 도심을 대상으로 공동구를 설치하기 위한 타당성 평가시스템 및 설계용량 최적화 등에 대한 관련 국외 지식재산권(특허 등)은 별도로 없음. - 공동구의 LCC 프로그램과 관련하여 공개된 특허는 존재하지 않고 있음. - 소단면 터널식 공동구의 공사/공정관리 프로그램과 관련하여 공개된 특허는 존재하지 않고 있음.

구 분	내 용
표준화현황	- 해외의 터널 설계분야에서는 신뢰성공학을 기반으로 하여 경제적이고 합리적인 설계가 가능한 한계상태설계법(LSD: Limit State Design)이 국제표준으로 자리 잡고 있음. - 유럽연합(Eurocode) 및 미국(AASHTO-LRFD), 캐나다(OHBDC) 등의 기술 선진국에서 종전의 결정론적인 안전율을 사용하는 허용응력설계법(ASD: Allowable Stress Design)에서 하중 및 저항의 공칭 값에 대한 실제값의 변동성으로 인한 불확실성을 고려할 수 있는 확률 통계적인 구조신뢰성 이론에 기초한 하중저항계수설계법(LRFD: Load and Resistance Factor Design)으로의 전환이 이루어 짐. - 국제표준화기구(ISO)와 건설관련 설계표준(ISO 2394) 역시 신뢰성기반 설계법을 채택하였음.

(1) 국외 기술현황

- ① 제1-1요소기술 : 도심지 공동구 수용시설별(3종이상) 설계용량 및 단면 최적화 기술 개발
 - ㉠ 국외의 경우 일본, 유럽에서 기존 도심지에 공동구를 적용하여 관리하고 있는 실정임.
 - ㉡ 국내 주요 도시처럼 밀집도가 높은 일본 동경도, 오사카시, 스위스 취리히시, 체코 프라하시 등은 해당 도시의 현황에 적합한 기존 도심지 대상의 공동구를 설치하고 운영 중 임.
 - ㉢ 공동구 설치를 위한 LCC 및 표준공정, 공사비 관리 시스템을 구축하고 있지는 않지만 공동구 적용을 위한 타당성 측면의 기술로 발전시키고 있음.
- ② 제1-2요소기술: 터널식 공동구의 글로벌 표준화 설계법(LRFD) 개발
 - ㉠ WTO체제 및 국제표준화기구(ISO)를 중심으로 북미지역(LRFD)과 유럽지역(CEN)의 선진국 위주로 성능중심 설계기준을 구축하려는 움직임이 활발해지고 있으며, 이에 따라 한계상태 설계법이 적용 추세에 있음.
 - ㉡ 라이닝 설계기술의 경우 TBM을 이용하여 시공하는 업체에서는 해외기업에 기술을 의존하고 있으며, 해외건설현장의 경우 해외설계회사와 협동으로 설계를 하며, 이에 경험적인 방법으로 기술력을 확보하고 있는 실정임.
 - ㉢ 유럽은 부분안전계수를 이용한 유로코드를 제정하였으며, 북미는 하중계수 및 저항계수를 통한 한계상태설계법을 교량 및 터널분야에 적용하고 있음.
 - ㉣ 국제표준화기구(ISO)는 공동구를 포함한 건설설계 분야에서 한계상태설계법을 국제표준으로 채택하고 있음.

③ 제1-3요소기술: 도심지 터널식 공동구 전주기 및 수용시설별 안전관리기술 개발

㉠ 영국은 CDM 규정을 통해 설계자의 의무로 건설작업 근로자, 유지관리 종사자, 시설 이용자들의 안전에 영향을 미치는 유해위험 요소를 고려하여 설계토록 함

㉡ 영국의 경우 건설사업의 전 과정에 걸친 일관된 안전 확보를 목적으로 하여 발주자, 안전감독자(Safety Co-ordinator, SC), 설계자, 원도급자 하도급자 등 각각의 참여자에게 의무를 부과하여 준행토록 규제함.

(2) 국외 시장현황

① 제1-1요소기술 : 도심지 공동구 수용시설별(3종이상) 설계용량 및 단면 최적화 기술 개발

㉠ 국외 공동구 시장변화의 특이성 없이 기존 공동구가 유지되고 있는 실정임.

㉡ 최근 급격한 경제성장으로 도시화가 무분별하게 진행되고 있는 개발도상국의 주요 도시는 장래 생활수준의 향상과 더불어 각종 공급시설을 공동 수용할 수 있는 터널식 공동구의 수요가 크게 증가할 것임.

㉢ LCC 시스템 및 표준공정 공사비 관리 시스템의 국외 시장 변화의 특이성 없음

② 제1-2요소기술: 터널식 공동구의 글로벌 표준화 설계법(LRFD) 개발

㉠ 교량 및 구조물의 경우 지속적인 연구개발을 통해 하중계수, 저항계수의 보정 및 적용 지반 구조물의 종류를 늘려가고 있음.

㉡ 개발도상국을 중심으로 급속도로 도시화가 되는 도시 및 재건축되는 도시 주변에는 향후 TBM의 적용이 필수불가결 하며, 이에 세그먼트 라이닝 설계기술의 수요도 동반상승 할 것으로 보임.

㉢ 공동구와 같은 지반구조물 설계 시 선진국에서는 한계상태설계법이나 생애주기비용 등의 사용으로 최적화 설계하는 것이 추세임.

㉣ 한계상태설계법을 국제표준으로 채택하고 있어 해외건설시장의 경우 발주시 국제 표준화기구(ISO) 규정에 따라 신뢰성기반의 한계상태설계법을 요구하고 있는 상황임.

③ 제1-3요소기술: 도심지 터널식 공동구 전주기 및 수용시설별 안전관리기술 개발

㉠ 4차 산업혁명에 따른 건설안전분야에 건설자동화 또는 스마트 안전체계 구축 등 새로운 시장이 열리고 있음

㉡ 공동구 건설사업을 포함한 지중화 사업은 주로 자연재해로 인한 단전사고의 저감, 도시미관의 향상 등을 목표로 수행되고 있는데 유럽의 경우, 경제발전이 앞선 국가들을 중심으로 도심지역에서의 지중화가 상당 수준 이루어져 있는 상황임.

(3) 국외 경쟁기관현황

① 제1-1요소기술 : 도심지 공동구 수용시설별(3종이상) 설계용량 및 단면 최적화 기술 개발

㉠ 공동구 설계용량 최적화에 대한 국외 경쟁기간의 특이점 없음.

㉔ 잦은 지진으로부터 원활한 공급을 확보할 수 있는 공동구의 뛰어난 재난안전성으로 인해서 일본의 국토교통성이 가장 활발하게 공동구에 대한 연구를 수행하고 있으며 프라하시의 경우 도심 역사와 문화유적의 보호를 위해서 공동구를 활발히 설치하고 있음.

㉕ LCC 시스템 및 표준공정 공사비 관리시스템에 대한 국외 경쟁기간현황 변화의 특이점이 없음.

② 제1-2요소기술: 터널식 공동구의 글로벌 표준화 설계법(LRFD) 개발

㉔ 터널분야의 경우, 일본이나 유럽에서 제시하고 있는 안전계수는 실제의 구조물에 발생하는 오차(모든 변동을 고려한 후에 설정할 필요가 있는 값)임에 따라 다양한 재료시험결과나 현장계측 결과 및 이론적, 경험적 데이터의 심도 있는 분석을 통하여 선정할 것을 제안.

㉕ 국외 설계업체들의 경우 각각의 설계컨설팅 회사마다의 설계기법들이 있으며, 해외 수치해석 프로그램 및 경험식들이 존재하여 개별적으로 경쟁력을 가지고 있음.

㉖ 중국, 일본 등도 한계상태설계법 및 성능기반설계법에 기초한 설계기준이 개발되어짐.

㉗ 미국, 유럽, 일본, 캐나다 등 선진국의 경우 터널식 공동구에 대한 한계상태설계기준을 개발하여 적용 중에 있음.

③ 제1-3요소기술: 도심지 터널식 공동구 전주기 및 수용시설별 안전관리기술 개발

㉔ 싱가포르의 영국의 건설안전 제도를 기본으로 안전관리 체계를 구축하고 있으며 노동부(MOM)와 도로교통청(LTA)의 건설안전제도를 통해 사고예방에 따른 재해발생률이 국내보다 현저히 낮은 수준을 보이고 있음.

㉕ 영국의 경우 안전사고의 50%는 설계자의 안전설계를 통해 예방 가능하다는 연구(HSE, 2003)를 통해 설계자의 안전설계의무를 더욱 강화함.

(4) 국외 지식재산권현황

① 제1-1요소기술 : 도심지 공동구 수용시설별(3종이상) 설계용량 및 단면 최적화 기술 개발

㉔ 공동구 설계용량 최적화에 대한 국외의 지식재산권 현황 변화 없음.

㉕ 일본 및 유럽 등은 자국의 도시유형과 공급시설의 특성에 적합한 연구를 수행하였으므로 관련된 별도의 지식재산권은 존재하지 않음.

㉖ 공동구 LCC 시스템 및 표준공정 공사비 관리시스템의 국외 지식재산권 현황 변화 없음.

② 제1-2요소기술: 터널식 공동구의 글로벌 표준화 설계법(LRFD) 개발

㉔ 국외의 경우 다양한 구조물에 대하여 경험적으로 설계기준은 적용되었으나, 기준의 특성상 특허는 따로 존재하지 않음.

㉕ 세그먼트 라이닝 설계부분 보다는 그 자체의 재료에 특성 및 배합비 등에 관련된 제

작 기술에 지식재산권이 있음.

㉔ 공동구의 공개된 특허는 존재하지 않고 있음.

㉕ 국외의 경우 터널식 공동구에 한계상태설계법이 적용되고 있으나 지식재산권은 존재하지 않음.

③ 제1-3요소기술: 도심지 터널식 공동구 전주기 및 수용시설별 안전관리기술 개발

㉔ 해당사항 없음.

(5) 국외 표준화현황

① 제1-1요소기술: 도심지 공동구 수용시설별(3종이상) 설계용량 및 단면 최적화 기술 개발

㉔ 국외 공동구의 설계용량 최적화에 대한 표준화 현황 없음.

㉕ 일본 및 체코 프라하시 등은 해당 도시의 유형에 적합한 수용시설별 표준기술을 연구.

㉖ 국외 공동구의 LCC 시스템 및 표준공정 공사비 관리시스템의 표준화 현황 없음.

② 제1-2요소기술: 터널식 공동구의 글로벌 표준화 설계법(LRFD) 개발

㉔ 미국의 경우 ASSHTO LRFD를 일본의 JSCE에서는 경험을 기본으로 한 LSD, 유럽의 경우 EURO CODE등 표준화를 통해 사회적인 비용 절약 및 노하우 축적이 진행됨.

㉕ 국외의 BS코드에서는 세그먼트의 설계에 관하여 자세히 표준화 시켰으며 이는 유로코드랑 연계하여 사용되어지고 있음.

㉖ 미국은 교량설계시 LRFD설계 의무화하고, 유럽은 유로코드를 표준화, 일본은 2001년부터 터널설계시 한계상태설계 지침 제시.

㉗ 미국의 경우 ASSHTO LRFD, 일본의 경우 경험을 기본으로 한 LSD, 유럽의 경우 EUROCODE 등 각 나라마다 표준화를 통해 공동구에 적용하고 있음

③ 제1-3요소기술: 도심지 터널식 공동구 전주기 및 수용시설별 안전관리기술 개발

㉔ 설계안전성검토 제도는 DfS(Design for Safety) 또는 Ptd(Prevention through Design)로 불리며, 영국, 호주, 싱가포르, 미국 등 다양한 국가에서 설계자의 의무조항 또는 권장사항으로 제시되고 있음.

㉕ 싱가포르의 경우 설계가 안전하다는 것을 보장하기 위해 GUIDE 라고 부르는 설계검토 과정을 도입하여 안전과 관련된 모든 정보를 관련 문서에 기록하고 있음.

(6) 국외 기타현황

① 제1-1요소기술: 도심지 공동구 수용시설별(3종이상) 설계용량 및 단면 최적화 기술 개발

㉔ 국외의 경우 기존 공동구 이외에 추가적인 현황 변화는 일본을 제외하고 미비한 수준임.

㉕ 도심지 공동구 활성화를 위한 설계용량 최적화 연구 등은 국내 공공기관 및 한국전력

공사 등의 해외(해외 신도시 개발 및 도심 재정비 사업 등) 진출에 활용될 수 있음.

- ㉔ 국외의 경우 LCC 및 표준공정/공사관리 시스템에 대한 자산관리적 측면의 연구는 활발히 진행되고 있으나 공동구에 맞춘 연구는 거의 없는 실정임.

② 제1-2요소기술: 터널식 공동구의 글로벌 표준화 설계법(LRFD) 개발

- ㉕ 구조분야에서 처음 도입된 글로벌 표준화 설계법은 성능중심의 설계기준으로서 유럽, 미국, 일본, 중국 등에서 활발한 도입 및 적용 단계에 있음.
- ㉕ 지반분야, 특히 교량기초 분야에서 국내에서는 처음으로 설계법 적용 및 기준 등을 제시하여 왔으나, 지하구조물로서 터널분야에서는 기존 허용응력설계법 대비 한계상태설계법의 비교검토 및 도입 논의가 시작되는 시점임.
- ㉕ 일본이나 유럽에서 제시하고 있는 안전계수는 실제의 구조물에 발생하는 오차임에 따라 다양한 재료시험결과나 현장계측 결과 및 이론적, 경험적 데이터의 심도 있는 분석을 통하여 선정할 것을 제안하고 있음.
- ㉕ 구조분야에서 처음 도입된 한계상태설계법은 성능중심의 설계기준으로서 유럽, 미국, 일본, 등에서 활발하게 도입 및 적용 단계에 있음.

③ 제1-3요소기술: 도심지 터널식 공동구 전주기 및 수용시설별 안전관리기술 개발

- ㉕ 호주의 경우 안전설계의 핵심요소는 위험관리접근법의 사용, 생애주기의 고려, 설계자의 지식 및 역량, 전문가와의 협력 및 조정, 정보 전달로 보고 있으며, 설계 및 위험관리프로세스의 통합을 위한 체계적인 접근법을 강조하고 있음.

나. 2세부: 도심지 소단면 터널식 공동구 굴진을 예측기법과 급곡구간/특수 지반 급속 시공기술 개발

<표 2.2.2> 2세부 국외 관련 분야의 기술 개발 현황

구 분	내 용
기술현황	- 일본의 경우 많은 시공경험을 통해 TBM 중절장치의 설계기술과 급곡구간 시공 기술 보유함. - 일본의 경우 정밀 시공을 통한 수평창지수재를 사용 유럽의 경우 gasket을 사용함. - 암질에서의 TBM 디스크 커터가 암질을 깎거나 찍어 내린 자국에 관한 연구가 lab scale 모사 실험과 수치적 해석을 하여 암반에서의 구속 압과 암반의 타입, 시료의 크기에 따른 디스크 커터의 성능을 실험 검증하였음 (Innaurato et al, 2007). - 국외연구 동향 암반에 따른 연구결과 및 수치해석 모델링 연구는 활발하게 진행 되고 있지만 연약지반에 의한 TBM 침하에 관한연구, 복합지반에서의 굴진률에 관한연구는 전무함. - 국외의 경우, 카피 커터 비트는 사질토 여굴 생성을 위해서만 활용되고 있음. 급 곡구간 암반지역에서는 아직 상용화된 기술이 없는 상태임.
시장현황	- 일본의 경우 기존 지상 교통시스템이 자하화 되고있는 추세이며, 도심지 터널 급 증에 따른 터널 기계화 시공 및 공동구 시장 규모가 커지는 추세. - TBM 공법은 유럽의 경우 90% 이상, 일본의 경우 40% 이상 터널공사에 적용됨. TBM 기술력이 우수하여 계속적인 증가 추세에 있으므로 세그먼트 적용도 지속 적으로 증가할 것임. - Datwyler, Phoenix가 대부분의 월드 터널용 지수재를 생산 및 납품함 - 국외의 경우에 있어서도 대부분이 시뮬레이션이나, 실제 개발한 TBM의 성능을 분석하는 추세이며, 실내모형 실험과 관련하여 서는 극히 부분적인 내용에 대해 서만 학술적 논문에 서술됨. - 급곡구 TBM시공에 있어 여굴생성은 필수불가결한 것이며, 전세계적으로 공동구 시장이 커짐에 따라 급곡구간 시공시장도 더불어 성장하고 있음. 암반에서 여굴 생성이 가능하다면 급곡구간 시장이 더욱 성장할 것으로 기대됨.
경쟁기관 현황	- TBM 제작사인 독일의 HERRENKNECHT, 캐나다의 LOVAT, 일본의 KAWASAKI, MITSUBISHI, HITACHI, KOMATSU 등이 있음. - 일본의 경우, PC강성을 이용하여 세그먼트 링을 연결시키는 P&PC 세그먼트 연결체 개발 및 세그먼트 복공법을 개발하였으며, 미국에서는 라이닝 및 코팅을 적용하여 공사함. - Datwyler, Phoenix, CI화성이 지수재 시장 경쟁 중임. - 중국 산둥대 지구물리타사 시험시설 및 일본 시공기술총합연구소가 있으나 실제 소단면 TBM장비가 들어가서 굴진할 수 있는 시험시설 및 연구소가 아님. - 사질토 지반에서 여굴을 생성하는 카피커터 기술은 kawasaki, JTSC, TECHGONG International Trading Co 업체 등이 있음. 사질토 지반에서 카피커 터의 최대 여굴깊이는 일반적으로 70-150 mm 정도임.

구 분	내 용
지식재산권 현황	- 콘크리트와 라이닝 이음부에 관한 특허는 독일 기업인 HOCHTIEF가 각각 6개, 3개를 보유하고 있음. 일본은 세그먼트 라이닝의 재료, 구조, 이음부, 제조방법 등 다양한 특허를 보유하고 있음. - 일본, 유럽 등 많은 국가에서 지수재에 대한 특허 있음, 급곡구간에 적용하는 지수재의 특허는 없는 것으로 조사됨. 단, 최근에 anchor type gasket에 대한 지적재산권 출원이 다수 이루어지고 있음. - 국외에서도 TBM에 관한 실험실 모사실험에 관한 특허는 존재하지 않으며, 대부분 현장에서의 TBM 굴착방법, 점검 보수 방법, 디스크 커터의 마모와 같은 현장에서 적용되는 특허가 대부분을 차지함. - 워터젯 시스템을 활용한 암반굴착 특허는 일부 존재하나, 카피커터를 대신하기 위한 암반여굴생성 관련 지식재산권은 존재하지 않음.
표준화현황	- 일본의 세그먼트 라이닝 시험방법으로 세그먼트 외경별(2~6m) 세그먼트 자체 만곡시험, 세그먼트 연결부 만곡시험, 잭주력 시험, 재하하중 및 시험체 규모 등의 시험 표준화가 되어 있음. - 급곡구간 이음부 방수시스템과 관련한 표준화 기준은 현재 국외에도 없음. - 국외에서도 마찬가지로 소단면 쉘드TBM 성능검증 시설이 전무하여 소단면 쉘드 TBM 성능검증 표준화에 대한 정립이 되어있지 않음. - 암반여굴 생성기술관련 표준화가 존재하지 않음.

(1) 국외 기술현황

- ① 제2-1요소기술 : 쉘드TBM 현장굴진자료 DATA분석을 통한 굴진성능 예측 및 산정기법 제시
- ㉠ 대표적으로 개별 디스크커터에 대해 선형절삭기계(Linear Cutting Machine)와 회전절삭기계(Rotary Cutting Machine) 등을 사용하여 직접적으로 디스크커터에 작용하는 하중을 관측함. 그 외에도 현장의 데이터를 이용하여 회귀분석을 수행하거나 유한요소 및 개별요소법을 통해 수치해석적으로 접근하는 사례도 있음.
- ㉡ 미국의 대학에서는 선형절삭기계의 실험결과를 통해 회귀분석을 수행하여 커터헤드와 전반적인 장비의 사양을 설계할 수 있는 CSM(Colorado School of Mines) 모델을 발전시킴(Rostami and Ozdemir, 1993; Rostami, 1997; Rostami, 2013). Bruland(2000)는 암석의 천공용이성 뿐만 아니라 암반의 불연속면의 빈도와 방향성을 고려하여 굴진율과 디스크커터의 마모도를 예측할 수 있는 설계차트를 개발하여 NTNU(Norwegian University of Science and Technology) 모델을 발전시킴.
- ㉢ Open TBM이나 지하수가 없는 건조한 암반상태에서는 전방의 암반을 맵핑하거나 샘플을 채취하여 조사할 수 있기 때문에 현장의 굴진데이터를 잘 활용할 수 있음. 이에 암반의 공학적 특성(일축압축강도 및 불연속면 특성)을 사전에 파악하여 TBM의 운전조건에 따른 압입깊이와 기계데이터간 상관관계를 분석하는 연구들이 수행되었음(Jing et al., 2019; Gong et al., 2007).

- ㉔ 기존의 통계적 방법론에서 벗어나 다양한 머신러닝 기법(서포트벡터머신, 인공신경망, 입자무리최적화, 그레이울프최적화, 퍼지, 차분진화, 유전자 알고리즘 등)을 이용하여 암반, 토사 그리고 복합지반에 대한 굴진율 예측 모델을 논문을 통해 지속적으로 보고되고 있음.
- ② 제2-2요소기술 : 소단면 터널식 공동구 급곡구간(R30m 급) 쉘드 TBM 추진기술 및 중절장치 개발
- ㉔ 일본의 경우 쉘드 장비 급곡(R10m)장치 까지 개발 완료 되어 상용화 되고 있는 실정임.
- ㉔ 해외의 경우 세그먼트라이닝의 재료에 따른 성능향상을 도모한 연구들은 지속적으로 이루어 졌으며, 60MPa 이상의 강도를 갖는 고성능 세그먼트의 개발을 위해 SFRC+RC 복합 세그먼트, 합성세그먼트, DRC, 고유동 복합체, P&PC 세그먼트 등의 연구가 진행됨. 재료적인 측면에서는 강섬유보강 콘크리트(SFRC)(Burgers, R. et. al., 2007)의 연구가 이어져 초고성능콘크리트(UHPC)를 이용한 세그먼트라이닝의 개발과 적용에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있음(Norbert, R. et. al., 2012). 대부분 강도 증진, 고유동성 재료 개발과 두께나 자중을 줄이는 방향의 연구가 주류임.
- ㉔ 독일 Datwyler社는 고성능의 ANCHOR TYPE EPDM 가스켓을 개발 하여 실제 터널구간에 적용 중에 있으며, 활발한 연구를 진행 중에 있음.
- ③ 제2-3요소기술 : 소단면 터널식 공동구 특수지반/특수조건 쉘드TBM 급속(downtime 40% 이하) 시공기술 개발
- ㉔ 국외의 경우 복합지층을 효율적으로 굴착하기 위한 커터 배열 및 설치, 장비의 운용 조건 등에 대한 가이드라인이 존재함.
- ㉔ 천층에서의 TBM을 사용한 터널 굴착 시 호박돌층을 통과하는데 국내와 마찬가지로 많은 기술적인 어려움이 발생함.
- ㉔ 외국의 호박돌층 통과 방법은 전방탐사를 통하여 호박돌층의 범위 및 분포를 사전 분석하여 터널구간의 우회 가능성이 있을 경우 우회하여 통과하기도 하지만 현실적으로 불가능한 경우가 발생함.
- ㉔ 우회가 불가능할 경우에는 호박돌층의 입자 분포 및 특성을 파악하여 그라우팅을 실시하여 충분한 막장압을 확보한 후 최적의 운용조건 하에서 굴착을 진행하고 호박돌층을 통과함.
- ㉔ 그라우팅의 보강 범위, 호박돌 층의 특성을 고려한 재료 및 공법의 선정에 대한 부분은 시공사의 노하우로 비공개임.
- ④ 제2-4요소기술 : 소단면 터널식 공동구 시공기술에 의한 소단면 터널식 공동구 성능 검증 시설 개발
- ㉔ 암질에서의 TBM 디스크 커터가 암질을 깎거나 찍어 내린 자국에 관한 연구가 lab scale 모사 실험과 수치적 해석을 하여 암반에서의 구속 압과 암반의 타입, 시료의 크기에 따른 디스크 커터의 성능을 실험 검증하였음 (Innaurato et al, 2007).

(2) 국외 시장현황

- ① 제2-1요소기술 : 쉘드TBM 현장굴진자료 DATA분석을 통한 굴진성능 예측 및 산정기법 제시
- ㉠ 쉘드TBM공법은 도심지에서 안정성과 환경적인 측면에서 장점이 부각되어 2010년도 세계 TBM장비 시장규모는 102억달러에서 2020년도 500억달러에 증가함.
 - ㉡ 국외 선진국의 경우 터널식 전력구는 국내 상황과 달리 국토가 넓거나 인구밀도가 작아 우리나라와 같은 터널식 전력구의 설치는 거의 없으며, 굴착기술은 대부분 도로 터널과 같은 사회간접시설에 활용되고 있음.
 - ㉢ 향후 중국, 중동, 인도, 동남아시아, 등에서 TBM 터널의 세그먼트 방수를 위해 지수재의 폭발적인 수요가 예상됨.
- ② 제2-2요소기술 : 소단면 터널식 공동구 급곡구간(R30m 급) 쉘드 TBM 추진기술 및 중절장치 개발
- ㉠ 일본의 경우 기존 지상 교통시스템이 지하화 되고 있는 추세이며, 도심지 터널 급증에 따른 터널 기계화 시공 및 공동구 시장 규모가 커지는 추세임.
 - ㉡ TBM 공법은 유럽의 경우 90% 이상, 일본의 경우 70% 이상 터널공사에 적용됨. TBM 기술력이 우수하여 지속적인 증가 추세에 있음.
 - ㉢ 현재 동남아시아(베트남,인도네시아,필리핀)등 새로운 시장이 많이 증가하는 추세임, 인도네시아 수도 이전을 위한 도시 인프라 구축, 필리핀 마닐라 지하철 터널공사 등 많은 터널 공사가 증가하고 있음.
 - ㉣ 일본의 오사카에 위치한 오오테츠다이와가와 고속도로 터널 현장의 총공사비 1,000 중 세그먼트비만 150억엔으로 큰 비중을 차지하고 있으며, 일본의 TBM 공법 적용이 전체의 40% 정도, 유럽의 경우도 TBM 공법이 증가 추세에 있으며 도심지의 경우 90% 이상이 적용되고 있음. TBM 기술력이 우수하여 증가추세에 있으므로 세그먼트도 적용도 지속적으로 증가 할 것으로 예상됨.
- ③ 제2-3요소기술 : 소단면 터널식 공동구 특수지반/특수조건 쉘드TBM 급속(downtime 40% 이하) 시공기술 개발
- ㉠ 국외에서도 공동구 건설 시 비교적 천층의 연약지반대를 통과함에 따라 특수지반/특수조건을 조우하는 경우도 증가할 것으로 보임. 관련 기술의 시장 또한 도시화가 급속도로 진행됨에 따라 커질 것으로 기대됨.
- ④ 제2-4요소기술 : 소단면 터널식 공동구 시공기술에 의한 소단면 터널식 공동구 성능 검증 시설 개발
- ㉠ 국외의 경우에 있어서도 대부분이 시뮬레이션이나, 실제 개발한 TBM의 성능을 분석하는 추세이며, 실내모형 실험과 관련하여 서는 극히 부분적인 내용에 대해서만 학술적 논문에 서술됨.

(3) 국외 경쟁기관현황

- ① 제2-1요소기술 : 쉘드TBM 현장굴진자료 DATA분석을 통한 굴진성능 예측 및 산정기법 제시
 - ㉠ 국내와 동일하게 쉘드TBM 굴진을 모델은 도출된 방법론과 각 국가별 현장의 지반 조건 및 장비의 운전현황 등에 따라 다르게 도출될 수 있기 때문에 경쟁보다는 유사한 환경에서 적절한 모델을 활용하는 것이 무엇보다 중요할 것으로 판단됨.
 - ㉡ 국외논문 및 세계학술대회 발표 등을 통하여 개발된 소단면 쉘드TBM 굴진을 모델을 지속적으로 홍보하여, 현재 세계에서 범용적으로 사용되고 있는 CSM(Colorado School of Mines) 모델 및 NTNU(Norwegian University of Science and Technology) 모델에 비해 향후 인용 및 활용도 측면에서 발전될 수 있도록 노력이 필요함.
 - ㉢ 이란, 싱가포르, 터키 등 경쟁기관에서는 다양한 머신러닝 기법(서포트벡터머신, 인공 신경망, 입자무리최적화, 그레이울프최적화, 퍼지, 차분진화, 유전자 알고리즘 등)을 이용하여 암반, 토사 그리고 복합지반에 대한 굴진을 예측 모델을 논문을 통해 지속적으로 보고되고 있음.
- ② 제2-2요소기술 : 소단면 터널식 공동구 급곡구간(R30m 급) 쉘드 TBM 추진기술 및 중절장치 개발
 - ㉠ TBM 제작사인 독일의 HERRENKNECHT, 미국의 Robbins, 일본의 KAWASAKI, KOMATSU, 중국의 CREG, CRCHI 등이 있으며 급곡 구간 시공을 위한 장비로는 일본의 TBM 제작사에서 소구경(2m)~대구경(15m)까지 급곡(R10m)시공 가능한 장비를 상용화함.
 - ㉡ 일본의 경우 스미모토 건설에서 PC강선을 이용하여 세그먼트 링을 연결시키는 P&PC 세그먼트 연결체를 개발하였으며, SHIMIZU사에서는 세그먼트 복공법 개발하였음. 미국의 LIFELAST에서는 Bright Water Sewer System 현장에 DuraShield 210 라이닝 및 코팅을 적용하여 공사하였음.
 - ㉢ 독일 Datwyler社, 영국 VIP社, 이탈리아 FAMA社, 등 고수압용 지수재를 활발히 개발 중에 있음.
- ③ 제2-3요소기술 : 소단면 터널식 공동구 특수지반/특수조건 쉘드TBM 급속(downtime 40% 이하) 시공기술 개발
 - ㉠ 해외 유수의 TBM 장비 제조사(Herrenknecht, CREG 등) 혹은 시공회사를 중심으로 노하우 형태로 기술을 보유하고 있을 것으로 판단함.
 - ㉡ Herrenknecht(독일), Palmieri(이탈리아)의 디스크커터 자체 제조 공장을 보유하고, TBM 및 현장 상황(암반상태)과 밀착되어 커터의 성능을 지속적으로 향상시키는 것으로 추정함.

④ 제2-4요소기술 : 소단면 터널식 공동구 시공기술에 의한 소단면 터널식 공동구 성능 검증 시설 개발

㉠ 국외의 경우 중국에서 실험용 TBM 굴진시험을 수행할 수 있는 토조를 보유하고 있으나, TBM 실험용 지상굴진시험 장비는 아직 보유하고 있지 않음.

(4) 국외 지식재산권현황

① 제2-1요소기술 : 쉘드TBM 현장굴진자료 DATA분석을 통한 굴진성능 예측 및 산정기법 제시

㉠ 쉘드TBM 현장굴진자료 데이터분석을 통한 굴진성능 예측 및 산정기법에 대한 지식재산권현황은 없음.

② 제2-2요소기술 : 소단면 터널식 공동구 급곡구간(R30m 급) 쉘드 TBM 추진기술 및 중절 장치 개발

㉠ 미국과 유럽에서는 독일기업인 HOCHTIEF가 각각 6개, 3개의 특허를 보유하고 있음. 콘크리트와 라이닝 조인의 이음부에 대한 특허로 콘크리트 내에 강재삽입을 포함하여 강재 인서트 고정구를 사용하고 이음부 고정 특허를 보유하고 있음.

㉡ 기존에 존재하던 이음부 방수시스템의 특허들은 대부분 기간이 만료되었고, 독일 중심으로 활발한 연구 중인 것으로 보임.

③ 제2-3요소기술 : 소단면 터널식 공동구 특수지반/특수조건 쉘드TBM 급속(downtime 40% 이하) 시공기술 개발

㉠ 현재까지 조사된 특수지반/특수조건에 대한 지식재산권은 없는 상태임.

④ 제2-4요소기술 : 소단면 터널식 공동구 시공기술에 의한 소단면 터널식 공동구 성능 검증 시설 개발

㉠ 국외 TBM 제조사에서 TBM 설계 및 제작에 관한 특허를 보유하고 있으나 TBM 실험용 성능검증 장비에 관한 특허를 보유하고 있지 않음.

(5) 국외 표준화현황

① 제 2-1요소기술 : 쉘드TBM 현장굴진자료 DATA분석을 통한 굴진성능 예측 및 산정기법 제시

㉠ 쉘드TBM 현장굴진자료 데이터분석을 통한 굴진성능 예측 및 산정기법에 대한 표준화현황은 없음.

② 제 2-2요소기술 : 소단면 터널식 공동구 급곡구간(R30m 급) 쉘드 TBM 추진기술 및 중절장치 개발

㉠ 일본에서는 세그먼트 라이닝의 재료, 구조, 이음부, 제조방법 등 다양한 특허를 보유

하고 있으며, MITSUBISHI HEAVY IND LTD와 SHIMIZU사가 주도적임. SHIMIZU사는 터널의 내면의 부식 저항성을 증가시킬 수 있도록 콘크리트 세그먼트 본체 내측면에 방수 기능을 갖는 내부재를 개발하여 부착하는 등 세그먼트 라이닝의 내구연한을 증진시키기 위한 기술도 개발 중임.

- ㉔ 일반적인 지수재의 물성치에 관한 표준화는 존재하나, 현장조건마다 다른 특징들에 맞는 표준화는 존재하지 않음.

- ③ 제 2-3요소기술 : 소단면 터널식 공동구 특수지반/특수조건 쉘드TBM 급속(downtime 40% 이하) 시공기술 개발

- ㉔ 특수지반/특수조건에 대한 표준화 관련 기술은 없는 것으로 조사되었으나, 미국, 독일, 중국 등 TBM 기술을 선도하고 있는 국가의 TBM장비 제조사, 시공사를 중심으로 노하우 형태로 기술을 보유하고 있을 것으로 판단함.

- ④ 제2-4요소기술 : 소단면 터널식 공동구 시공기술에 의한 소단면 터널식 공동구 성능 검증 시설 개발

- ㉔ 국외에서 TBM 실대형 굴진 성능검증에 대한 표준화된 시험규정이나 법안이 존재하지 않음.

(6) 국외 기타현황

- ① 제 2-1요소기술 : 쉘드TBM 현장굴진자료 DATA분석을 통한 굴진성능 예측 및 산정기법 제시

- ㉔ 해당사항 없음.

- ② 제 2-2요소기술 : 소단면 터널식 공동구 급곡구간(R30m 급) 쉘드 TBM 추진기술 및 중절장치 개발

- ㉔ 일본 하수도협회(1990)에 발간한 ‘シールド工事用標準セグメント’자료에는 세그먼트 외경별(외경 2~6m) 세그먼트 자체 만족시험, 세그먼트 연결부 만족시험, 잭추력 시험 재하하중 및 시험체 규모 등의 시험 등의 표준화가 되어있음.

- ③ 제 2-3요소기술 : 소단면 터널식 공동구 특수지반/특수조건 쉘드TBM 급속(downtime 40% 이하) 시공기술 개발

- ㉔ 해당사항 없음.

- ④ 제2-4요소기술 : 소단면 터널식 공동구 시공기술에 의한 소단면 터널식 공동구 성능 검증 시설 개발

- ㉔ 국외에서 기존과 다른 굴진 방식과 버력 처리 방식을 가지는 새로운 형태의 TBM 장비를 제조하기 시작하면서 TBM에 대한 범위를 확장시켜 나가고 있는 추세임.

다. 3세부: 공동구용 수직구 급속시공을 위한 저소음/무진동 시공시스템, 보강/차수 기술 개발

<표 2.2.3> 3세부 국외 관련 분야의 기술 개발 현황

구 분	내 용
기술현황	- HUMES(호주): 수직구 굴착장비 별도. 일반 굴삭기를 사용하여 지반 굴착과 동시에 지상 프리캐스트 콘크리트 세그먼트를 조립하여 하강하는 공사 공법이 존재함. 굴착장비 벽체 연결 없이 분리식으로 별도 사용하며, 지상부 유압장치를 이용한 하강 구조가 특징임. - HERRENKNECHT(독일): 수직구 굴착장비와 함께 지상에서 수직구 벽 프리캐스트 콘크리트 세그먼트를 조립 하강 공사하는 방법 존재함. 장비가가 고가이고 자동화 컨트롤 장치 및 굴착/구조물 동시시공이 특징임.
시장현황	- 호주는 국토교통성 차원에서 국가 기관과 기업간에 인프라 협력 관계를 구축하고 지하공간 연결과 활성화를 위한 목적으로 터널 굴착을 할 때 경관 개선, 도로 상의 공간 확보 등을 위해 다수의 수직구를 굴착하고 있음. 일본과 유럽 등의 선진국에 이어 2016년 6월 수직구 굴착을 시작해 현재 진행중임. - HUMES(호주): 호주에서 가장 큰 프리캐스트 콘크리트 제조업체이며 전 세계 시장으로 진출함. - HERRENKNECHT(독일): SVM 수직구 굴착 및 라이닝 프리캐스트 조립공법으로 전 세계 시장에 진출하였음.
경쟁기관현황	- 해당사항 없음.
지식재산권현황	- 특허정보 검색 사이트인 키프리스(KIPRIS)에서 Utility tunnel(공동구), Shaft(수직구), Top-down lining (하향식 라이닝)을 포함한 조건으로 검색한 결과 2017년 4월 기준으로 미국은 291건, 유럽 30건 일본은 0건으로 미국과 유럽 쪽이 많은 기술을 확보하고 있는 것으로 검토되었음.
표준화현황	- 개발 기술과 관련된 표준 현황의 검토 결과 기준 및 규격에 대한 현황 변화 내용 없음.

(1) 국외 기술현황

- ① 제3-1요소기술 : 공동구용 수직구 저소음/무진동 급속굴착(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발
 - ㉠ 외국은 Bottom-up 방식 수직구 구조물 건설보다 진보된 Top-down 방식의 수직구 구조물 건설 공법이 적용되고 있음. 수직굴착과 동시에 수직구 벽체를 PC조립방식으로 시공하고 있으며, 저소음 저진동 방식의 굴착장비 개발과 더불어 라이닝 구조물 연결 조립 공법을 이용하여 다양한 현장 적용 및 실험을 통해 기술력 축적을 진행하고 있음.
 - ㉡ 유럽과 미국 일본 등 수직터널 공법 관련 선진국에서는 기계식 굴착장비사용과 병행하여 하향식 수직터널 콘크리트 라이닝에 대한 시공 수행과 수입 및 설계수명을 고려한 공사방법이 수행되고 있음. 또한 다양한 굴착 및 구조물공법과 굴착장비를 사용하여 터널을 시공한 경험을 다수 보유하고 있음.
 - ㉢ 보다 발달된 유럽, 미국 등의 기계식 굴착과 하향식 라이닝 시공을 접목한 기술을

개발하여 저소음, 무진동, 공기/공사비 절감의 구현이 필요함. Herrenknecht의 VSM8000은 일축압축강도 100MPa 이하의 암에 지하수위 존재 여부에 관계없이 빠르게 굴착이 가능함. 또한 경제성 분석시 할암공법(DARDA)으로 설계된 추식터널 축조비용보다 다소 저렴함. 다만 굴착장비가 매우 고가로 손료를 반영할 겨우 비경제적일 수 있으며 장비운용을 위한 숙달된 운전원이 필요하는 등의 문제가 발생할 수 있음.

㉠ 저소음/무진동 암반 굴착은 국내외에서 크게 다르지 않음. 암 천공, 할암 등에 대한 개별적 연구와 주로 할암기를 적용한 적용한 암반 절개에 대한 연구가 진행되고 있음.

② 제3-2요소기술 : 공동구용 수직구 하향식 라이닝 현타 급속(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발

㉠ HUMES(호주): 수직구 굴착장비 별도. 일반 굴삭기를 사용하여 지반 굴착과 동시에 지상 프리캐스트 콘크리트 세그먼트를 조립하여 하강하는 공사 공법이 존재함. 굴착 장비 벽체 연결 없이 분리식으로 별도 사용하며, 지상부 유압장치를 이용한 하강 구조가 특징임.

㉡ HERRENKNECHT(독일): 수직구 굴착장비와 함께 지상에서 수직구 벽 프리캐스트 콘크리트 세그먼트를 조립 하강 공사하는 방법 존재함. 장비가가 고가이고 자동화 컨트롤 장치 및 굴착/구조물 동시시공이 특징임.

③ 제 3-3요소기술 : 공동구용 수직구 접속부 보강/차수장치(심도 20m 이상) 및 바이오 폴리머 차수공법 개발

㉠ 개발하고자 하는 기술과 관련하여 구체적인 적용 사례를 찾아볼 수 없음.

(2) 국외 시장현황

① 제3-1요소기술 : 공동구용 수직구 저소음/무진동 급속굴착(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발

㉠ 호주는 국토교통성 차원에서 국가 기관과 기업간에 인프라 협력 관계를 구축하고 지하공간 연결과 활성화를 위한 목적으로 터널 굴착을 할 때 경관 개선, 도로 상의 공간 확보 등을 위해 다수의 수직구를 굴착하고 있음. 일본과 유럽 등의 선진국에 이어 2016년 6월 수직구 굴착을 시작해 현재 진행중임.

㉡ 미국 하와이에서 HERRENKNECHT사의 수직구 굴착 장비(VSM)를 이용하여 진행되었던 하수 운송시설(Ala Moana Wastewater Pump Station, WWPS)이 완공되었음. 이는 미국에서 VSM 장비가 두 번째로 사용된 시공 사례임.

② 제3-2요소기술 : 공동구용 수직구 하향식 라이닝 현타 급속(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발

㉠ HUMES(호주): 호주에서 가장 큰 프리캐스트 콘크리트 제조업체이며 전 세계 시장

으로 진출함.

- ㉞ HERRENKNECHT(독일): SVM 수직구 굴착 및 라이닝 프리캐스트 조립공법으로 전세계 시장에 진출하였음.

- ③ 제3-3요소기술 : 공동구용 수직구 접속부 보강/차수장치(심도 20m 이상) 및 바이오폴리머 차수공법 개발

㉞ 개발하고자 하는 기술과 관련하여 시장현황 변화를 찾아볼 수 없음

(3) 국외 경쟁기관현황

- ① 제3-1요소기술 : 공동구용 수직구 저소음/무진동 급속굴착(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발

㉞ 중국 TBM 제작업체(NHI, CREG 등) 방문 탐방 수행 결과, 중국 내 TBM 제작 업체에서 독일 herrenknecht 사의 굴착 장비와 유사한 수직구 굴착 장비 제작 중이라는 정보를 얻음

- ② 제3-2요소기술 : 공동구용 수직구 하향식 라이닝 현타 급속(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발

㉞ 공동구용 수직구 하향식 라이닝에 관한 국외 경쟁기간의 특이점 없음.

- ③ 제3-3요소기술 : 공동구용 수직구 접속부 보강/차수장치(심도 20m 이상) 및 바이오폴리머 차수공법 개발

㉞ 일본 NTT(전신전화공사)에서 박스형 수직구-터널 접속부에 조인트 장치를 개발하여 “Technical Review” 형태로 소개한 사례가 있음.

(4) 국외 지식재산권현황

- ① 제3-1요소기술 : 공동구용 수직구 저소음/무진동 급속굴착(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발

㉞ 개발하고자 하는 기술에 대한 해외 지식재산권현황에는 변화 없음.

- ② 제3-2요소기술 : 공동구용 수직구 하향식 라이닝 현타 급속(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발

㉞ 특허정보 검색 사이트인 키프리스(KIPRIS)에서 Utility tunnel(공동구), Shaft(수직구), Top-down lining (하향식 라이닝)을 포함한 조건으로 검색한 결과 2017년 4월 기준으로 미국은 291건, 유럽 30건 일본은 0건으로 미국과 유럽쪽이 많은 기술을 확보하고 있는 것으로 검토 되었다.

③ 제3-3요소기술 : 공동구용 수직구 접속부 보강/차수장치(심도 20m 이상) 및 바이오폴리머 차수공법 개발

㉠ 개발하고자 하는 기술에 대한 해외 지식재산권현황에는 변화 없음

(5) 국외 표준화현황

① 제3-1요소기술 : 공동구용 수직구 저소음/무진동 급속굴착(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발

㉠ 해당사항 없음.

② 제3-2요소기술 : 공동구용 수직구 하향식 라이닝 현타 급속(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발

㉠ 해당사항 없음.

③ 제3-3요소기술 : 공동구용 수직구 접속부 보강/차수장치(심도 20m 이상) 및 바이오폴리머 차수공법 개발

㉠ 해당사항 없음.

(6) 국외 기타현황

① 제3-1요소기술 : 공동구용 수직구 저소음/무진동 급속굴착(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발

㉠ 해당사항 없음.

② 제3-2요소기술 : 공동구용 수직구 하향식 라이닝 현타 급속(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발

㉠ 해당사항 없음.

③ 제3-3요소기술 : 공동구용 수직구 접속부 보강/차수장치(심도 20m 이상) 및 바이오폴리머 차수공법 개발

㉠ 해당사항 없음.

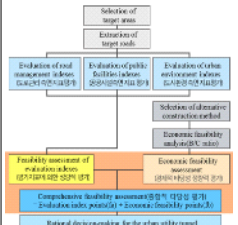
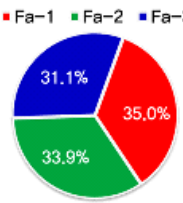
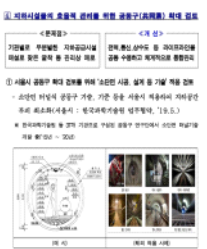
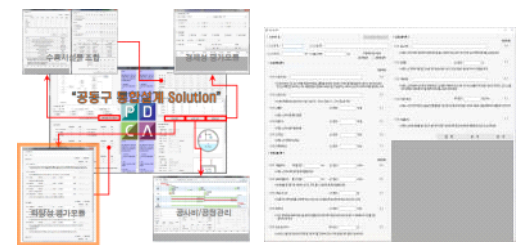
1. 도심지 터널식 공동구 최적 설계용량산정 및 글로벌 표준화 설계기술 개발

세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과																															
국내외 자료 수집 및 현황조사, 기초 모델 제시	- 관련 문헌 조사 - 최적 설계용량 의사결정 구조	- 공동구 현황 자료 수집 결과 - 도심지 공동구 설치에 대한 설계용량 최적화의 통합 알고리즘																															
건설기준 조사 및 분석을 통한 공동수용 충돌사항 조사 및 해결 방안 도출	- 공동구 현황 및 사례에 대한 기초조사 - 건설기준 조사/분석 및 수용시설물별 특성/문제점 분석	- 국내외 공동구 관련 기초자료 조사 및 데밍사이클을 이용하여 타당성 평가, 경제성 평가, 단면 최적화를 통합하는 의사결정 알고리즘 정의 - 건설기준에 따른 개선 방안 검토 및 수용시설물별 문제점/대책																															
공동구 활성화 방안 기초조사	VE/LCC 분석을 통한 공동구 수용시설물의 최적 대안 결정 방법 수행	기초모델 수립																															
공동구 활성화 방안 중 지역별 최적 수용시설 항목 분석	- 지역별 최적 수용시설 항목 분석 - 지역별 터널식 공동구 설치 가능 지역 분석	수용시설물 중수 분석 <table border="1" data-bbox="984 1529 1171 1655"> <thead> <tr> <th rowspan="2">구분</th><th rowspan="2">종류</th><th colspan="5">월수</th></tr> <tr> <th>1월</th><th>4월</th><th>7월</th><th>10월</th><th>12월</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">유역별 평가</td><td>유역별 평가</td><td>A-01</td><td>A-02</td><td>A-03</td><td>A-04</td><td>A-05</td></tr> <tr> <td>유역별 평가</td><td>B-01</td><td>B-02</td><td>B-03</td><td>B-04</td><td>B-05</td></tr> <tr> <td>유역별 평가</td><td>C-01</td><td>C-02</td><td>C-03</td><td>C-04</td><td>C-05</td></tr> </tbody> </table>	구분	종류	월수					1월	4월	7월	10월	12월	유역별 평가	유역별 평가	A-01	A-02	A-03	A-04	A-05	유역별 평가	B-01	B-02	B-03	B-04	B-05	유역별 평가	C-01	C-02	C-03	C-04	C-05
구분	종류	월수																															
		1월	4월	7월	10월	12월																											
유역별 평가	유역별 평가	A-01	A-02	A-03	A-04	A-05																											
	유역별 평가	B-01	B-02	B-03	B-04	B-05																											
	유역별 평가	C-01	C-02	C-03	C-04	C-05																											
공동구 활성화 방안 중 설치 가능 규모별 활성화 방안검토	- 공동구 설치 가능 규모(면적)별 검토 - 공동구내 수용시설물 결정을 위한 단위 모듈 개발	- 규모(면적)별 설치 타당성 분석 - 수용시설물 최적 조합 단위 모듈																															

나. 도심지 터널식 공동구 단면 최적화 설계 기술 개발 (㈜대정건설턴트)

세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
해외 터널식 공동구 적용사례 조사 및 국내외 공동구 단면 설계 및 배치기준 분석	- 해외 터널식 공동구 단면 적용 사례 조사 - 단면내 수용시설 및 부대시설 배치특성 분석 - 국내/외 공동구 단면 설계 및 배치기준 조사 - 기준별 단면설계 항목 비교분석	
내공단면 결정을 위한 세부 설계항목 개발	- 수용시설별 설계항목 도출 - 수용시설/용량별 예비단면 작성	- 설계기준 분석에 의한 설계항목 도출 - 수용시설/용량별 예비단면 도출
터널식 공동구 단면설계 매뉴얼 개발 (시설별 점유공간, 조합수용 기법, 원형단면 배치 기법 등 제시)	터널식 공동구 단면설계 매뉴얼 개발	- 터널식 및 개착식 표준단면(3종) - 단면설계 매뉴얼

다. 도심지 유형별 공동구 설치 타당성 평가시스템 개발 (㈜한국종합기술)

세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
- 국내·외 사례 및 기초모델	- 국내·외 사례, 선행 연구 조사 - 도심지 유형별 특성이 고려된 평가 기초모델 개발	- 기존 도심지 공동구 도입을 위한 공사여건 ● 터널식·개착식 공동구의 적용성 검토 - 체코 프라하시 사례 조사, 국토해양부 (2008) 이전 선행연구 사례 분석 ● 도심지 유형별 특성이 고려된 평가 기초모델   도심지 유형에 따른 특성이 고려된 타당성 평가시스템과 “도심지 공동구 설계용량 최적화”
- 타당성 평가지표 항목의 정량적 평가	- 도심지 유형을 고려한 평가지표 항목의 AHP분석 및 평가가중 치 설정 - 표 항목별 정량적 평가방법	- 도심지 유형을 고려한 평가항목의 AHP분석 을 통한 정량적 평가가중치 및 평가방법 ● 도로관리, 공공시설, 도시환경 측면의 상 위 3개부문, 하위 16개 지표항목 제시  상위지표 도로관리 측면(Fa-1) 공공시설 측면(Fa-2) 도시환경 측면(Fa-3) 
- 도심지 공동구 정책 반영	- 실용화 관련 도심지 공동구의 정책적 반영 등 ● 서울시&공동구 연구단 기술협 약 이용 ● 국토교통부 공동구 활성화 종합 연구부분 중 타당성 평가시스템 반영	- 서울시 지하시설물 통합안전관리 대책의 일환으로 도심지 공동구 정책적 반영  
- 통합프로그램 중 타당성 모듈 개발	- 도심지 유형을 고려한 공동구 통합프로그램 중 타당성 평가 부분 모듈 개발 - 프로그램 현장검증 추진	- 정량적 타당성 평가모듈을 고려한 통합프 로그램 개발 및 소프트웨어 등록 예정  서울시 간선도로 대상 프로그램 현장 검증

라. 도심지 터널식 공동구 설치에 위한 LCC 표준공정 및 공사비 관리시스템 개발 (유니콘스(주))

세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
- 국내외 자료 수집 및 현황 조사, 기초 모델 제시	- 관련 문헌 조사 기초모델을 수립	- 편익 및 비용 항목을 정의하고 정식화를 통해 비용 산정 방법 도출 - 도심지 공동구 공사의 공사비/공정관리의 기초 항목 구성																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
- 경제성평가 시스템 기초 및 모델 설계	- 관련 문헌 조사 및 기초모델 수립 - 기초모델에 의한 공동구 형식별 B/C분석 및 상세모델에 의한 공동구 최적 LCC산정	- 경제성 평가 및 공사비/공정에 관련된 국내외 문헌조사 및 편익/비용 항목을 정의하고 정식화를 통해 비용 산정 방법 도출과 공사비/공정관리의 기초 항목 구성 - 기초(계획) 및 상세(설계) 모델 제시																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
- 경제성 분석 통합모델 수립 - 경제성 평가 매뉴얼 개발	- 기존 평가 방법에 추가적인 항목을 도입한 분석 - 경제성 평가를 위한 LCC 및 B/C 분석 방법 제시	- 경제성 분석에 적합한 기초 및 상세 모델 제시 <table border="1"><thead><tr><th>구분</th><th>내용</th><th>기초모델</th><th>상세모델</th></tr></thead><tbody><tr><td rowspan="10">편익</td><td>B1</td><td>만족효과</td><td>X</td><td>○</td></tr><tr><td>B2</td><td>편익효과</td><td>○</td><td>○</td></tr><tr><td>B3</td><td>도움효과</td><td>○</td><td>○</td></tr><tr><td>B4</td><td>편익효과</td><td>○</td><td>○</td></tr><tr><td>B5</td><td>편익효과</td><td>X</td><td>○</td></tr><tr><td>B6</td><td>편익효과</td><td>X</td><td>○</td></tr><tr><td>B7</td><td>편익효과</td><td>○</td><td>○</td></tr><tr><td>B8(주거)</td><td>공동구공사비</td><td>X</td><td>○</td></tr><tr><td>B9(주거)</td><td>공동구공사비</td><td>X</td><td>○</td></tr><tr><td>B10(주거)</td><td>공동구공사비</td><td>○</td><td>○</td></tr><tr><td rowspan="8">비용</td><td>C1</td><td>초기공사비</td><td>○</td><td>○</td></tr><tr><td>C2</td><td>유지관리비</td><td>○</td><td>○</td></tr><tr><td>C3</td><td>폐기비용</td><td>X</td><td>○</td></tr><tr><td>C4</td><td>공동구공사비</td><td>○</td><td>○</td></tr><tr><td>C5</td><td>공동구공사비</td><td>○</td><td>○</td></tr><tr><td>C6(주거)</td><td>공동구공사비</td><td>X</td><td>○</td></tr><tr><td>C7(주거)</td><td>공동구공사비</td><td>X</td><td>○</td></tr><tr><td>C8(주거)</td><td>공동구공사비</td><td>○</td><td>○</td></tr></tbody></table> - 매뉴얼을 통한 경제성 평가 방법 제시	구분	내용	기초모델	상세모델	편익	B1	만족효과	X	○	B2	편익효과	○	○	B3	도움효과	○	○	B4	편익효과	○	○	B5	편익효과	X	○	B6	편익효과	X	○	B7	편익효과	○	○	B8(주거)	공동구공사비	X	○	B9(주거)	공동구공사비	X	○	B10(주거)	공동구공사비	○	○	비용	C1	초기공사비	○	○	C2	유지관리비	○	○	C3	폐기비용	X	○	C4	공동구공사비	○	○	C5	공동구공사비	○	○	C6(주거)	공동구공사비	X	○	C7(주거)	공동구공사비	X	○	C8(주거)	공동구공사비	○	○																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
구분	내용	기초모델	상세모델																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
편익	B1	만족효과	X	○																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	B2	편익효과	○	○																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	B3	도움효과	○	○																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	B4	편익효과	○	○																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	B5	편익효과	X	○																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	B6	편익효과	X	○																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	B7	편익효과	○	○																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	B8(주거)	공동구공사비	X	○																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	B9(주거)	공동구공사비	X	○																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	B10(주거)	공동구공사비	○	○																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
비용	C1	초기공사비	○	○																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	C2	유지관리비	○	○																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	C3	폐기비용	X	○																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	C4	공동구공사비	○	○																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	C5	공동구공사비	○	○																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	C6(주거)	공동구공사비	X	○																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	C7(주거)	공동구공사비	X	○																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	C8(주거)	공동구공사비	○	○																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
- 공동구 형식별 개략 공사비 산정과 적정 공기 분석 방법 제시 - 공사비/공정 분석 매뉴얼 개발	- 공사비/공정 검토 및 분석, 알고리즘 작성 - 공사비/공정(공기) 분석 매뉴얼 작성	- 표준 공사비 및 공정 작성 - 매뉴얼 작성 ■ 건설비(Standard) 단위 <table><thead><tr><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th>구분</th><th></th></tr></thead></table>	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	
구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분				

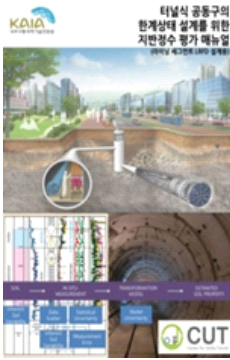
마. 글로벌 표준화 설계요소기술 개발 및 최적 설계기준 정립 (한국건설기술연구원)

세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
- 한계상태 설계기준의 연구 방향 확립	- 국내외 구조물 설계기준 검토	- 일본, 미국, 영국, 유럽 등 선진국의 설계기준 분석 결과
	- 연구방향 확립	- 설계법 적용성 및 설계 알고리즘 검토를 통한 연구 방향 설정
- 하중 및 저항치의 통계적 특성치 구축	- 재료변수(프리캐스트 콘크리트와 철근)에 대한 통계 특성치 분석	- 국내 생산 프리캐스트 콘크리트 제품 및 철근 강도 시험 통계 분석 자료 - 프리캐스트 콘크리트 및 철근의 재료변수에 대한 확률분포 함수 추정
	- 하중분포함수 추정을 위한 통계특성치 분석	- 국내외 쉘드 터널의 작용하중 조사 및 분석 자료 - 정량적 평가가 가능한 지표를 이용한 하중 산정을 위해 설계보고서 분석
- 한계상태 방정식의 정의 및 파괴확률 분석	- 한계상태방정식 정의를 위한 상세 자료 수집 및 분석	- 국내외 지중구조물에 대한 자료 수집 및 분석을 통한 작용하중 선정 - 한계상태방정식 정의를 위한 기본 함수 - 터널식 공동구의 작용하중 및 한계상태 방정식을 이용한 신뢰성 해석 결과
- 최종 목표 신뢰도 지수 제시	- 쉘드 TBM 설계 자료를 바탕으로 한계상태 설계기준 신뢰도 지수 검토	- 수집한 설계사례에 대한 신뢰도 지수 분석을 통해 목표신뢰도 지수를 4.30으로 제시
- 최종 저항계수 및 하중 계수 제시	- 결정된 목표신뢰도 지수를 바탕으로 하중계수의 민감도 분석	- 하중계수 및 저항 계수 각각 제시
- 터널식 공동구 한계상태설계 기준(안) 제시	- 터널식 공동구의 한계상태설계법에 의한 설계기준(안) 제시	- 한계상태설계법을 적용한 터널식 공동구 한계상태 설계기준(안)

바. 한계상태설계법에 의한 소단면 터널식 공동구 라이닝 설계 기술 개발
(㈜평화엔지니어링)

세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
- 터널식 공동구 라이닝 설계기준 및 설계사례 조사	- 국내외 라이닝 설계기준 조사 및 분석	- 국내외 설계코드 자료수집 및 분석 - 국내외 설계코드의 사용한계상태, 강도한계상태, 극한한계상태에 대하여 검토
	- 국내외 라이닝 설계사례 조사 및 분석	- 국내외 설계사례 자료수집 및 분석 - 국내 외 설계 관련 자료수집을 통한 적용성 검토수행
- 한계상태설계 법에 의한 세그먼트라이 닝 설계법 비교	- 기존설계법과 한계상태설계법 의 설계 분석	- 기존 설계법과 한계상태설계법 간의 설 계법 비교분석 - 기존 설계법과 한계상태설계법 간의 설 계항목 비교분석
	- 기존설계법과 한계상태설계법 의 주요 구조설계항목에 대한 비교 검토	- 한계상태설계법 적용시 주요영향인자 분석 - 한계상태설계법 적용시 설계항목 세부검토
- 설계조건별 수치해석에 의한 비교검토	- 한계상태설계법에 의한 설계 조건별 수치해석에 의한 비교 검토	- 한계상태설계법 중 최근 개정된 AASHTO LRFD Road Tunnel Design(2017)를 분석 및 설계법별 구조 해석 및 단면력 비교 - 설계법별 상세 설계조건(CASE 세분화 및 다양화)에 따른 구조해석 실시 - 설계법별 이음부 강성조건, 하중계수, 하 중수정계수에 따른 단면력 비교를 통 한 영향 분석 - 설계조건별 구조해석에 의한 거동양상 비교검토
- 세그먼트 라이닝의 한계상태설계 법에 의한 예비설계	- 실제 강도설계법으로 설계된 세그먼트 라이닝 구조계산결과 와 한계상태설계법에 의한 구 조계산 결과비교	- 한계상태설계법 적용시 강도설계법 대비 여유 안전율 확보로 보강량 감소 가능
- 터널식 공동구 라이닝의 한계상태설계 법에 의한 구조해석 절차정립	- 한계상태설계법을 적용한 세그 먼트 라이닝 설계지침 정립 및 설계 항목별 구조해석 설계절 차 제시	- 한계상태설계법을 적용한 세그먼트 라이 닝 설계절차 제시 및 설계지침(매뉴얼) 초 안 작성
- 한계상태설계 법에 의한 터 널식 공동구 라이닝 설계매 뉴얼 제시 및 현장 적용	- 터널식 공동구 라이닝의 한계 상태설계법에 의한 설계매뉴얼 제시	- 한계상태설계법을 적용한 세그먼트 라이 닝 설계매뉴얼 제시

사. 글로벌 표준화설계법 적용을 위한 국내 지반특성값 평가기법 개발
(주)희송지오텍)

세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
풍화대 강도특성 측정장치 개발	- 국내외 사용중인 강도특성 장치를 검토하여 정확한 지반 강도 물성치 산출이 가능한 측정장치 개발 - 풍화대 강도특성 측정장비 개발 - 현장검증	개발된 장비에 대하여 2차례 현장검증을 진행하였고 일반적인 수동식 측정에 비해 정확도 및 일관성이 증가한 것으로 판단됨 
지반특성값 평가프로그램 개발	- 기존 조사자료중 현장 및 실내시험 결과를 수집 분석하여, 데이터베이스를 구축 - 지반물성 특성값의 변동성 중심으로 확률밀도분포함수 결정 등 통계량 및 변동계수를 제시	지반특성값 평가 프로그램 개발 
표준절차 지침서 작성	- 터널식 공동구 설계를 위한 지반정수 및 각종 지반조사 방법 검토 - 주요 지역별 지층별 지반물성 DB 구축	각종 지반조사 내용과 국내외 설계기준 검토를 통해 ‘터널식 공동구의 한계상태 설계를 위한 지반정수 평가 매뉴얼’ 작성 

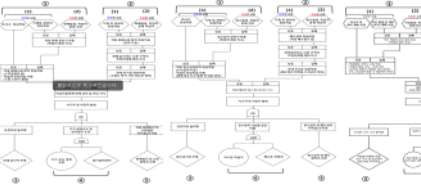
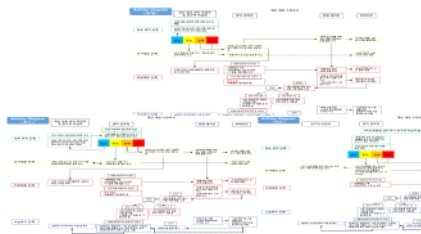
아. 글로벌 표준화 설계법 적용을 위한 내진해석 및 내진설계 기술개발
(주)우성디앤씨)

세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과																																																																																
- 지진시 지중구조물의 신뢰성 해석 및 목표신뢰도 지수 검토	- 기존설계자료 분석 • 기존 설계자료 분석 - 한계상태설계에 따른 검토 • 기존강도설계법과 한계상태 설계법에 따른 단면력 검토 - 한계상태설계에 따른 검토 • 기존강도설계법과 한계상태 설계법에 따른 단면력 검토 - MCS에 의한 파괴확률 산정 • 기존설계사례에 대한 파괴확률 및 신뢰도지수 산정 - 목표신뢰도지수 및 하중계수 검토 • 하중계수 변화에 따른 기존 구조물의 최소요구저항강도에 따른 신뢰도 지수 검토	- 지진시 지중구조물의 신뢰성 해석 및 목표신뢰도지수 검토 • 지진 지중구조물의 목표신뢰도지수 산정을 위하여 기존설계사례에 대한 신뢰성 해석을 수행하고 MCS에 의한 파괴확률 및 신뢰도 지수를 산정 <table><tr><th>Models</th><th>F.S</th><th>파괴확률</th><th>신뢰도지수(β)</th></tr><tr><td>M-1</td><td>1.57</td><td>2.55E-05</td><td>4.05</td></tr><tr><td>M-2</td><td>1.69</td><td>6.80E-06</td><td>4.35</td></tr><tr><td>M-3-a</td><td>1.49</td><td>5.90E-05</td><td>3.85</td></tr><tr><td>M-3-b</td><td>2.00</td><td>1.23E-07</td><td>5.16</td></tr><tr><td>M-3-c</td><td>2.00</td><td>1.00E-11</td><td>6.71</td></tr></table> • 기존구조물의 하중계수 변화에 따른 최소요구저항강도에 따른 신뢰도 지수를 검토하고 하중계수 제시 <table><tr><th></th><th>D</th><th>EV</th><th>EH</th><th>WA</th><th>EQ</th><th>β</th></tr><tr><td>AASHTO</td><td>1.25</td><td>1.35</td><td>0.75</td><td>1</td><td>1</td><td>2.200</td></tr><tr><td>CASE1</td><td>1.25</td><td>1.35</td><td>0.75</td><td>1.05</td><td>1</td><td>2.253</td></tr><tr><td>CASE2</td><td>1.25</td><td>1.35</td><td>0.75</td><td>1</td><td>1.05</td><td>2.473</td></tr><tr><td>CASE3</td><td>1.25</td><td>1.35</td><td>0.75</td><td>1.05</td><td>1.05</td><td>2.526</td></tr><tr><td>CASE4</td><td>1.25</td><td>1.35</td><td>0.75</td><td>1.1</td><td>1</td><td>2.396</td></tr><tr><td>CASE5</td><td>1.25</td><td>1.35</td><td>0.75</td><td>1</td><td>1.1</td><td>2.746</td></tr><tr><td>CASE6</td><td>1.25</td><td>1.35</td><td>0.75</td><td>1.1</td><td>1.1</td><td>2.852</td></tr></table>	Models	F.S	파괴확률	신뢰도지수(β)	M-1	1.57	2.55E-05	4.05	M-2	1.69	6.80E-06	4.35	M-3-a	1.49	5.90E-05	3.85	M-3-b	2.00	1.23E-07	5.16	M-3-c	2.00	1.00E-11	6.71		D	EV	EH	WA	EQ	β	AASHTO	1.25	1.35	0.75	1	1	2.200	CASE1	1.25	1.35	0.75	1.05	1	2.253	CASE2	1.25	1.35	0.75	1	1.05	2.473	CASE3	1.25	1.35	0.75	1.05	1.05	2.526	CASE4	1.25	1.35	0.75	1.1	1	2.396	CASE5	1.25	1.35	0.75	1	1.1	2.746	CASE6	1.25	1.35	0.75	1.1	1.1	2.852
Models	F.S	파괴확률	신뢰도지수(β)																																																																															
M-1	1.57	2.55E-05	4.05																																																																															
M-2	1.69	6.80E-06	4.35																																																																															
M-3-a	1.49	5.90E-05	3.85																																																																															
M-3-b	2.00	1.23E-07	5.16																																																																															
M-3-c	2.00	1.00E-11	6.71																																																																															
	D	EV	EH	WA	EQ	β																																																																												
AASHTO	1.25	1.35	0.75	1	1	2.200																																																																												
CASE1	1.25	1.35	0.75	1.05	1	2.253																																																																												
CASE2	1.25	1.35	0.75	1	1.05	2.473																																																																												
CASE3	1.25	1.35	0.75	1.05	1.05	2.526																																																																												
CASE4	1.25	1.35	0.75	1.1	1	2.396																																																																												
CASE5	1.25	1.35	0.75	1	1.1	2.746																																																																												
CASE6	1.25	1.35	0.75	1.1	1.1	2.852																																																																												
- 지진시 지중구조물의 신뢰성 해석 및 목표신뢰도지수 검증 (β=2.0~3.0 구간상의 최적목표치 검증)	- 지진시 지중구조물의 신뢰성 해석 및 목표신뢰도지수 검토 • 국내지반특성을 고려한 지진 하중에 대한 확률특성치를 산정하고 이를 고려하여 목표신뢰도 지수 검증 • 지진시 목표신뢰도 지수 : 2.3 - 지진시 목표신뢰도 지수 해외기준 검토	- 지진시 지중구조물의 신뢰성 해석 및 목표신뢰도지수 검토 • 국내지반물성치를 고려한 지진하중 확률특성치 산정 • 지진시 목표신뢰도 지수 제안 : 2.3 - 미국, 유럽기준과의 비교 검토 • 미국기준 • NCHRP :2.4~2.9 • AISC : 2.5 • 캐나다(CHBCD):2.9 • 터키문헌:2.5																																																																																
- 구조안전성 및 경제성을 고려한 내진설계법과 설계기준(안)	- 한계상태기반 터널식 공동구 설계기준(안)(내진설계편) 작성	- 한계상태법에 의한 터널식 공동구 설계기준(안)(내진설계편)																																																																																

자. 도심지 소단면 터널식 공동구 건설단계별 안전위험요인을 고려한 안전 관리기술 개발 (한국시설안전공단)

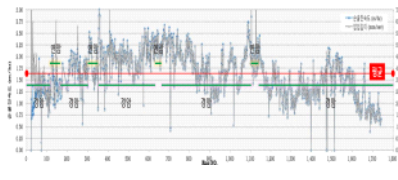
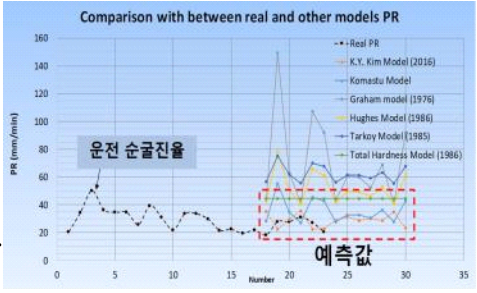
세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
- 소단면 터널식 공동구 공사 특성 파악 - 국외 선진 건설안전 시스템 분석 - 설계안전성 검토 제도 분석	- 건설안전정보시스템의 취약 공종 분석 - 사례분석을 통한 공종별 위험요소 분석 - 국외 건설안전 매뉴얼 및 위험성 평가기준 분석 - 관련법령 및 제도 분석	- COSMIS 시스템상의 공종별 위험요소 분석 - 위험성 평가기준 분석 - 관련법령 및 제도 분석
- 안전위험요인 발굴, 위험요인 분류 및 중요도 파악, 타당성 검토	- 문헌, TBM 터널현장 방문조사, 국외 위험요인 자료 조사들을 통한 안전위험요인 발굴 - 전문가 자문, 델파이기법을 활용한 위험요소 분류 및 중요도 파악	- 발파공법에 의한 터널공사 위험요소 80개 발굴 및 공종별 분류. TBM 터널공사 위험요소 96개 발굴 및 25개로 분류 - 델파이기법을 이용한 위험요소별 중요도 파악을 수행하였으며, 해당 결과를 한국터널지하공간학회 논문 게재
- 위험성 평가방법 및 저감기법 리스트	- 공동구 안전 위험요소의 위험성 평가 방법 제시 - 추가 위험요소 도출 및 위험요소의 저감기법 리스트 개발	- 5×5 매트릭스의 위험성 허용기준 개발, 전문가 의사결정 방법을 활용한 위험성 결정 방법 제시, 핵심 위험요소 도출 및 위험성 평가 결과 제시 - 터널식 공동구와 개착식 공동구의 세부 공사 종류별 안전 위험요소 분류 및 추가 위험요소 선정, 위험요소에 대한 계획·설계·시공 단계별 저감기법 개발
- 건설단계별 안전관리 기준 및 설계안전성 검토 작성을 위한 매뉴얼(안)	- 건설단계별 안전관리 기준 제시 - 설계안전성검토 작성을 위한 매뉴얼(안)	- 공동구 계획, 설계, 시공단계 각각의 공동구 특성에 적합한 안전관리 업무 작성 - 각 건설단계별로 주요 세부공사에 대한 안전확보방안, 건설단계별 설계안전성검토 절차, 보고서 작성방법 등을 제시 - 공동구 건설공사 지하안전관리 업무 및 안전관리계획 수립 업무 작성 - 작성 내용 취합의 “공동구 건설공사 안전관리 업무 매뉴얼(안)” 개발
- 공동구 건설공사 안전관리 업무 매뉴얼 및 건설안전 업무 실용화	- 공동구 건설공사 안전관리 업무 매뉴얼 최종본 개발 - 공동구 안전관리 업무의 실용화	- 법·제도 변경사항 반영, 위험요소 및 저감기법 보완 등을 통한 매뉴얼 최종본 개발 - 국가건설기준 ‘공동구 건설기준 개정(안)’에 안전관리 업무 수록하였으며, 공동구 설계기준 및 표준시방서 최종 수록을 위해 국가건설기준센터와 협의 진행

차. 도심지 소단면 터널식 공동구 시공 중 대형건설재해 대응 기술 개발
(인천대학교 산학협력단)

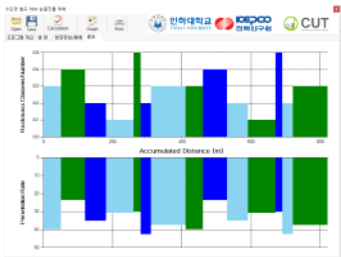
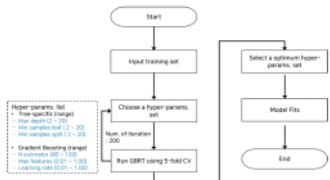
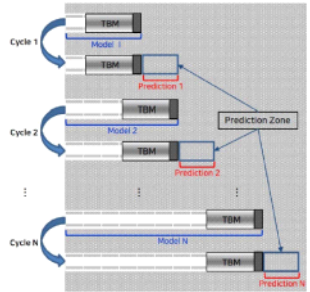
세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
- 재해 유형 별 단계 설정 - 재해 유형 별 시나리오 도출	- 재해 유형 별 위기경보 수준을 관심-주의-경계-심각 등 4단계로 구분 - 위험성 평가 기법을 분석하고 공동구 시공 특성에 맞는 기법으로 CCA기법을 선정하여 KOSHA GUIDE의 CCA작성 방법에 따라 재해 유형 별 발생 시나리오 도출	- 재해 유형 별 단계 설정  - 재해 유형 별 시나리오 도출 
- 공동구 시공 중 대형재해 위험요인을 기반으로 건설재해 대응 매뉴얼(안) 작성	- 재해 유형 별 대응 대책으로 Activity Diagram을 활용하여 재해 발생 시 각 대응 주체들의 행동요령을 단계별로 정의하여 행동 다이어그램 작성 - 국내외 제도 현황 및 기존 재해 사례를 분석하고, 연구 내용을 수록한 매뉴얼(안) 개발	- Activity Diagram을 활용한 대응 대책  - 매뉴얼(안) 개발 
- 매뉴얼 적용성 검토 및 시공 중 대형건설재해 대응 대책 실용화	- 기존 재해 사례 및 관련 매뉴얼과 비교 분석을 통한 매뉴얼 적용성 검토 - 연구성과의 실용화를 위해 국가건설기준 ‘공동구 건설기준 개정(안)’에 대응 대책을 반영하였음	- 공동구 건설기준 개정(안)에 반영 

2. 도심지 소단면 터널식 공동구 굴진을 예측기법과 급곡구간/특수지반 급속 시공기술 개발

가. 소단면 터널식 공동구 쉘드TBM의 현장굴진자료 DB구축/굴진을 산정 기법 제시 (한국전력공사 전력연구원)

세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
- 현장 굴진자료 DB구축 굴진을 산정기법 제시	- 쉘드TBM 굴진율DB 구축 • 쉘드TBM 굴진율 영향인자 분석 • 굴진율 영향인자 DB 카테고리 정립 • 국내·외 쉘드TBM 제작사 조사 및 보유장비 스펙분석 • 전력구 현장의 공사현황, 지질특성, 장비현황 분석 및 굴진DB 및 장비운용 현황 분석 	- 현장별 굴진율 DB 분석 • 총 10곳의 현장관련 지반 및 기계데이터 구축 및 현장별 굴진율 분석  - 쉘드TBM 굴진DB 관리 시스템 개발 • 현장개요, TBM 장비정보, 시추결과, 암반분류, 기계데이터 구축 프로세스 개발 • 데이터별(지반 및 기계) 상관관계 자동화 분석기능 개발 • 사내 전사적용
- 소단면 터널식 공동구 굴진을 산정기법 제시	- 통계분석을 통한 쉘드TBM 순굴진을 산정기법 제시 • 회귀분석을 활용한 순굴진을 예측 모델 제시 • 현장별 순굴진을 회귀모델 제시 - 굴진DB 구축 및 분석을 통한 쉘드TBM 순굴진을 산정기법 제시 - 쉘드TBM 실험실 굴진실험을 통한 순굴진을 산정기법 제시 • 암반강도별(20, 50, 70, 100MPa) 총 6회의 실험실 실험수행 • 쉘드TBM 장비의 추력, 회전속도(RPM)에 따른 실험수행	- 통계분석을 통한 현장별 순굴진을 예측 회귀모델 개발 • 현장 굴진율과 비교결과, 순굴진을 오차를 20% 이내 달성  - 쉘드TBM 실험실 굴진실험기반 순굴진을 산정기법 제시 • 암반강도와 장비의 추력조건을 고려할 수 있는 순굴진을 산정기법 개발 • 쉘드TBM 장비 구동부 토크-RPM 상관관계 분석을 통한 쉘드TBM 최적 운전조건 제시방법 제안

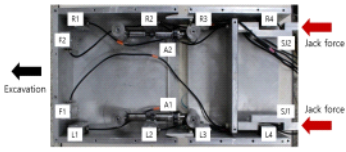
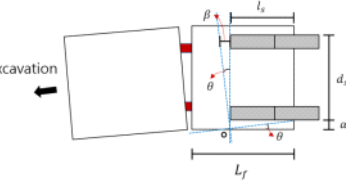
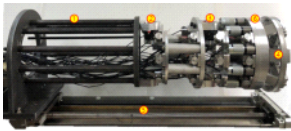
나. 소단면 쉼드 TBM 복합지반(토사/암반지반) 실굴진을 예측 모델 및 프로그램 개발 (인하대학교 산학협력단)

세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과																																			
- 최적화기법을 적용한 쉼드TBM 굴진을 예측 프로그램 개발	- Python 프로그래밍 언어를 이용하여 ANFIS기반 쉼드TBM 굴진을 예측 알고리즘을 개발하였으며, Visual Basic 프로그래밍 언어를 통해 UI (user interface)를 개발.  - 국내 3 곳의 전력구 현장에서 획득한 데이터를 이용하여 ANFIS모델을 개발 - 기준에 개발된 라쏘 및 인공신경망 모델과 성능비교.	- 검증데이터에 대하여 오차백분율은 라쏘회귀는 36.94%, 인공신경망은 29.33%으로 나타났다으며, 4차년도에 개발된 ANFIS모델의 오차 백분율은 20.27%으로 분석됨. - ANFIS모델에 대한 예측결과는 4차년도 질적성과 기준인 30%±10% 이내로 달성완료 하였음. <table><tr><th rowspan="2">모델</th><th colspan="2">훈련데이터로 테스트</th><th colspan="2">검증데이터로 테스트</th></tr><tr><th>절대평균백분율오차</th><th>r제곱</th><th>절대평균백분율오차</th><th>r제곱</th></tr><tr><td>라쏘 회귀</td><td>0.3085</td><td>0.309</td><td>0.3694</td><td>0.286</td></tr><tr><td>인공신경망</td><td>0.1675</td><td>0.773</td><td>0.2593</td><td>0.537</td></tr><tr><td>ANFIS</td><td>0.1467</td><td>0.763</td><td>0.2027</td><td>0.667</td></tr></table>	모델	훈련데이터로 테스트		검증데이터로 테스트		절대평균백분율오차	r제곱	절대평균백분율오차	r제곱	라쏘 회귀	0.3085	0.309	0.3694	0.286	인공신경망	0.1675	0.773	0.2593	0.537	ANFIS	0.1467	0.763	0.2027	0.667											
모델	훈련데이터로 테스트			검증데이터로 테스트																																	
	절대평균백분율오차	r제곱	절대평균백분율오차	r제곱																																	
라쏘 회귀	0.3085	0.309	0.3694	0.286																																	
인공신경망	0.1675	0.773	0.2593	0.537																																	
ANFIS	0.1467	0.763	0.2027	0.667																																	
- 현장적용을 통한 쉼드TBM 순굴진을 예측모델 검증 및 업데이트	- 예측모델 구축알고리즘 개선. 모델 구축시간 단축을 위해 GBRT (Gradient Boosting Regression Tree)기반 알고리즘 개발.  - 예측성능 향상을 위한 새로운 예측방식인 Sequential 방법을 제안.  - 다양한 전력구 현장적용 및 성능검증 (5차년도 ~ 6차년도)	- A 전력구 현장적용 결과 (잔여구간 50~90%), 평균 오차 백분율은 11.96%로 5차년도 질적성과 기준인 25±10% 이내로 달성완료 하였음. <table><tr><th></th><th>Train 50%</th><th>Train 60%</th><th>Train 70%</th><th>Train 80%</th><th>Train 90%</th><th>Average</th></tr><tr><td>R-squared (train)</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>R-squared (5-fold cv)</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>R-squared (test)</td><td>0.79</td><td>0.80</td><td>0.77</td><td>0.83</td><td>0.74</td><td>0.78</td></tr><tr><td>RMSE (test)</td><td>11.13</td><td>11.40</td><td>11.77</td><td>11.56</td><td>13.93</td><td>11.96</td></tr></table> - B 전력구 현장적용 결과 (잔여구간 50~90%), 평균 오차 백분율은 19.65%로 5차년도 질적성과 기준인 25±10% 이내로 달성완료 하였음. - C 전력구 현장적용 결과, 평균 오차 백분율은 23.12%로 6차년도 질적성과 기준인 20±10% 이내로 달성완료 하였음.		Train 50%	Train 60%	Train 70%	Train 80%	Train 90%	Average	R-squared (train)	-	-	-	-	-	-	R-squared (5-fold cv)	-	-	-	-	-	-	R-squared (test)	0.79	0.80	0.77	0.83	0.74	0.78	RMSE (test)	11.13	11.40	11.77	11.56	13.93	11.96
	Train 50%	Train 60%	Train 70%	Train 80%	Train 90%	Average																															
R-squared (train)	-	-	-	-	-	-																															
R-squared (5-fold cv)	-	-	-	-	-	-																															
R-squared (test)	0.79	0.80	0.77	0.83	0.74	0.78																															
RMSE (test)	11.13	11.40	11.77	11.56	13.93	11.96																															

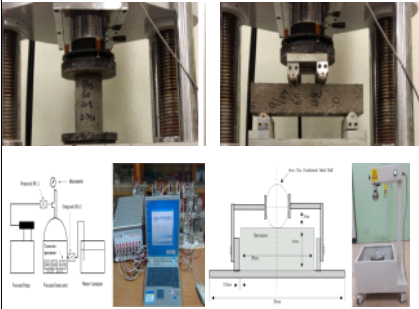
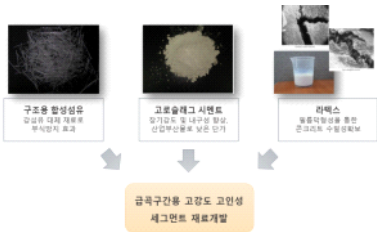
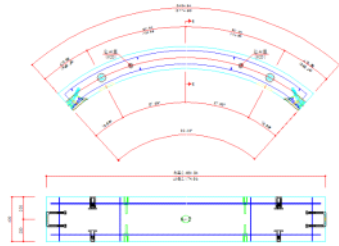
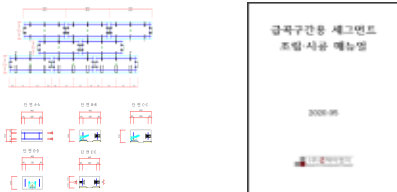
다. 공동구(직경 3.5m급) 급곡(R30m) 시공을 위한 급곡 장치 개발
(이엠코리아㈜)

세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
급곡장치 개념 설계 및 상세 설계, 시제품 제작 진행	- 국내외 선행 사례 벤치마킹을 적용한 중절 구조 분석 - 개념 설계 및 주요인자 분석 진행 - 핵심 부품 상세 설계진행	- 개념 설계 및 상세 설계 결과 - 벤치 마킹 급곡 장치 조사 보고서 - 급곡 장치 개념 도면 - 급곡장치 중절잭 기술검토보고서 - 급곡장치 Curve 기술검토보고서 - 국산화 개발 장비 학술지 개제 - 급곡장치 국산화 도면 100매 - 국내 비SCI 논문개제 1건 - 디자인 출원 1건 - 급곡장비 설계검토 보고서 - 급곡장비 유압유닛, 잭 제작
시제품 제작 및 장비별 성능 검증, 급곡장치 2차 자체 평가	- 급곡장치 호환 설계 및 시제품 제작 - 구조 해석 - 자체 인터페이스 검증	- 시제품 제작 완료 - 관련 특허 출원 2건 - 디자인 등록 1건 - 급곡장치 검사 절차서 - 시제품 제작 - 성능 평가 보고서 및 체크 시트 - 홍보성과 2건
실대형실험 결과를 적용한 장비최적화 및 운영관리 방안제시	- 실험 분석을 통한 장비운용 및 굴진 관리 최적화 도출 - 가이드프레임을 적용한 급곡 R30m 검증	- 굴진을 분석 장비 운영관리방안제시 - 가이드프레임 적용한 급곡R30m 검증 - 국내 비SCI 논문개제 1건 - 장비 최적화 체크시트 1건 - 현장 적용(상용화) 1건 - 홍보성과 1건

라. 급곡구간 소형 쉴드TBM 세그먼트 및 굴진 안정을 위한 시공기술 개발
(호서대학교 산학협력단)

세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
급곡구간 터널굴착에 관한 쉴드TBM 추진 압력 적용 기술 실험	- R=30m급 급곡선 굴착시 발생 가능한 문제점 분석 - 중절각이 적용된 쉴드 TBM 장비에 가해지는 토압의 상호 거동 분석실험 	쉴드 TBM 곡선부 추진시 작용 토압 실험 분석 결과 중절각도에 의해 장비의 변위가 크지 않다면 쉴드잭을 동일한 압력으로 추진하는 것이 좋지만 중절각이 6°이상으로 커진다면 곡선부 굴진 방향 내측의 쉴드잭에 더큰 추진력이 가해지도록 힘의 분배가 필요하다고 판단되었음
모형 시뮬레이션 장비제조를 위한 장비제원 관련 조사 및 연구	급곡구간 굴착시 중요 기술 요소 분석 	테일 클리어런스 및 쉴드잭 편압 추진길이 산정 산정된 편심의 길이적용시 내측부 테일 클리어런스의 여유 부족으로 세그먼트와 접촉가능하므로 문제 발생가능성이있어 $\beta < 58.61$를 적용해야 안정성을 확보 할 수 있을것으로 판단되었음
모형 시뮬레이션을 위한 장비 제작	- 모형 급곡구간 쉴드 TBM 굴착장비 제작 - 급곡구간 굴착 축소모형 쉴드 TBM - 자동화 제어 시스템 	축소모형 쉴드 TBM 제작에 따른 문제점 보완 - 기존 볼베어링 대비 굴착시 백러쉬가 거의 없는 크로스 롤러 베어링 으로 교체 - 제어시스템의 측정제어 기능 추가 및 UI개략도 변경 - 급곡구간 터널 굴착 장치 특허 출원
급곡구간 굴착 시뮬레이션 실험	- 모형 시뮬레이션을 통한 장비내 가해지는 토압 및 추진 압력 분석 - 급곡구간 추진 시스템 검증 - 시공 가이드라인 개발	급곡구간 설계 및 시공 가이드라인 구축 

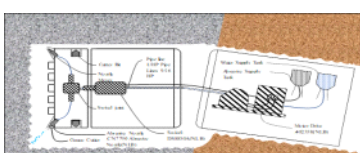
마. 급곡구간 세그먼트 라이닝 기술 개발을 위한 세그먼트 보강상세 및 최적형상 개발 (㈜콘텍이엔지)

세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
급곡구간 세그먼트 라이닝 기술 개발을 위한 세그먼트 보강상세 기술 개발	구조용 합성섬유와 폴리머를 사용한 세그먼트 재료의 물리·역학적 및 내구성능 평가 실시 	자체부식의 우려가 있는 강섬유의 대체 재료 구조용 합성섬유를 사용하고, 세그먼트의 내구성 증진을 위한 폴리머를 사용한 고강도·고인성 세그먼트 재료 개발  국외 SCI(E) 논문 게재 1건 특허 등록 및 기술이전 1건
급곡구간 세그먼트 라이닝 기술 개발을 위한 세그먼트 최적형상 개발	FRP Plate를 적용한 급곡구간용 세그먼트의 실험형 성능 평가 실시 	섬유보강 세그먼트의 최대 휨하중 증가를 위하여 조립이 간편한 Plate형의 유리섬유강화 플라스틱을 보강재로 적용한 급곡구간용 FRP Plate 세그먼트 개발  국내 논문 게재 1건 특허 등록 및 기술이전 1건
급곡구간 세그먼트 라이닝 기술 개발을 위한 세그먼트 시공기술 개발	FRP Plate 시제품 제작 및 조립방법 검토 	급곡구간용 세그먼트 조립 및 시공매뉴얼 작성 

바. 지수재 최적화를 통한 급곡구간 이음부 방수시스템 및 시공기술 개발
(건국대학교 산학협력단)

세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
- 지수재 방수성능 평가 장비 개발	- 지수재에 따른 내수압 실험 장비 개발 - 가스켓, 수팽창 지수재의 내수압 실험을 통한 방수성능 검증	- 지수재별 내수압 실험 진행 • 1열 배열 수팽창 지수재, 1열배열 가스켓 내수압 실험 진행 • 2열 배열 수팽창 지수재, 2열 배열 가스켓+수팽창 지수재 내수압 실험 진행 • 새롭게 제안한 EPDM 가스켓 내수압 실험 진행
- 1열 배열, 2열 배열 내수압 실험결과 비교 및 평가	- 1열 배열 수팽창 지수재와 2열 배열 수팽창 지수재의 내수압 실험결과 비교분석 - 1열 배열 가스켓과 2열 배열 가스켓+수팽창 지수재의 내수압 실험결과 비교분석	- 비교분석 결과 • 1열 배열 수팽창 지수재의 내수압 실험결과와 2열 배열 수팽창 지수재의 내수압 실험결과는 거의 유사하다고 볼 수 있고 두 실험 모두 Offset에 대한 대응성은 우수하나 Gap이 커짐에 따라 방수성능이 취약하다는 결과를 얻을 수 있었음 • 1열 배열 가스켓의 내수압 실험결과와 2열 배열 가스켓+수팽창 지수재의 내수압 실험결과와의 추이는 비슷하였지만 2열 배열의 방수성능이 보다 뛰어나다고 판단되며, 두 실험 모두 Gap에 대한 대응성은 우수하나 Offset이 커짐에 따라 방수성능이 취약하다는 결과를 얻을 수 있었음.
- 일면 지수재 설치 및 개발	- 일면 지수재 방수형식 제안 • 일면 가스켓의 시공방안 제안 • 일면 가스켓 내수압 실험 진행 및 결과분석	- 한 면에만 가스켓을 설치하여 가스켓과 세그먼트가 맞닿게 하는 새로운 이음부 방수형식을 제안하였다. • 접촉면의 감소, 편심으로 인한 변형, 가스켓의 들림 현상 등의 방수성능을 저하시키는 요인을 제거하는 장점이 있다. • 시공오차에서 Offset을 배제할 수 있으며, 코너부 누수현상을 줄일 수 있음. • 급곡구간의 누수를 방지하고자 일면 지수재 설치에 관한 기술이전 체결

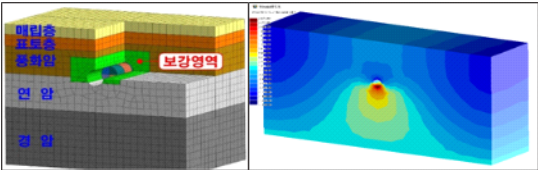
사. 워터젯을 이용한 급곡구간 여굴생성 기술개발 (부산대학교 산학협력단)

세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과																								
- 급곡구간 암반여굴 생성을 위한 워터젯 영향인자 도출	- 카피커터 및 워터젯 시스템 특성 조사 - 암반여굴 생성에 영향을 미치는 주요 워터젯 인자 도출 - 암반여굴 생성에 영향을 미치는 주요 암반물성 도출	- TBM 및 워터젯 운용변수 및 에너지 변수로 나누어 워터젯 영향인자를 고려함. 워터젯 영향인자는 이송속도, 이격거리, 수압, 유량, 연마재 투입량로 도출됨. - 암반여굴 생성에 영향을 미치는 암반물성은 일축압축강도로 도출됨.																								
- 워터젯 영향인자에 따른 암반 여굴량 상관관계 분석	- 영향인자에 따른 최대 암반 여굴깊이 분석 - 영향인자에 따른 암반 여굴량 상관관계 도출 	- 보통암 기준(UCS: 37.5 MPa)으로, RPM이 0.1일 때 약 265 mm의 절삭깊이, 그리고 RPM이 1.0일 때 약 65 mm의 절삭깊이가 가능함을 규명. - 상관관계 분석에서 절삭깊이는 유량의 증가에 따라 절삭깊이는 비선형적으로 증가하나, 압력의 증가에 따라 선형적으로 증가하는 것으로 분석됨.																								
- 효율적인 암반여굴생성을 위한 워터젯 최적변수 결정	- 암반의 상태(강도)에 따른 굴착 여굴깊이 확보를 위한 최적 워터젯 변수 분석 - 워터젯 시스템 설계를 위한 워터젯 최적변수 결정	- 실험을 통해 도출한 최적 연마재/물 비는 10%(부피 기준)임. - 기준 에너지(64.4 J) 조건(55mm 여굴깊이)에서 RPM: 0.5, 워터젯 유량: 26.3 l/min, 압력: 285 MPa이 최적변수로 결정됨. RPM이 0.25로 낮을 경우, 요구되는 워터젯 변수값은 감소함.																								
- 급곡구간 암반여굴 생성을 위한 워터젯 시스템 설계안 제시	- TBM 내부 노즐 및 초고압 펌프 설계안 작성 - 워터젯을 이용한 암반여굴 생성 작업순서도 작성 	- 2종류의 TBM RPM 조건을 기준으로 워터젯 시스템 설계(값)안 작성. 극경암 기준 TBM 내부 설치를 위한 워터젯 펌프 성능 100~200 Hp 필요함으로 분석. <table><tr><th>Case</th><th>TBM RPM</th><th>TBM excavation rate [m/hr]</th><th>Standoff distance</th><th>Abrasive feed rate</th><th>Water pressure [MPa]</th><th>Water flow rate [l/min]</th><th>Designed Pump spec. [Hp], safety factor: 1.5~2</th></tr><tr><td>A</td><td>0.25 [traverse speed 40 mm/s for 3.5m TBM]</td><td>0.5~1.0</td><td>10 cm [focusing tube 0.229 cm 사용]</td><td>8.4 kg/min (#40 garnet)</td><td>180 (+ 0.8)</td><td>20.9 [orifice 0.04 inch 사용]</td><td>84 [100]"</td></tr><tr><td>B</td><td>0.50 [traverse speed 80 mm/s for 3.5m TBM]</td><td>0.5~1.0</td><td>10 cm [focusing tube 0.229 cm 사용]</td><td>10.5 kg/min (#40 garnet)</td><td>285 (+ 10.0)</td><td>28.3 [orifice 0.04 inch 사용]</td><td>177 [200]"</td></tr></table>	Case	TBM RPM	TBM excavation rate [m/hr]	Standoff distance	Abrasive feed rate	Water pressure [MPa]	Water flow rate [l/min]	Designed Pump spec. [Hp], safety factor: 1.5~2	A	0.25 [traverse speed 40 mm/s for 3.5m TBM]	0.5~1.0	10 cm [focusing tube 0.229 cm 사용]	8.4 kg/min (#40 garnet)	180 (+ 0.8)	20.9 [orifice 0.04 inch 사용]	84 [100]"	B	0.50 [traverse speed 80 mm/s for 3.5m TBM]	0.5~1.0	10 cm [focusing tube 0.229 cm 사용]	10.5 kg/min (#40 garnet)	285 (+ 10.0)	28.3 [orifice 0.04 inch 사용]	177 [200]"
Case	TBM RPM	TBM excavation rate [m/hr]	Standoff distance	Abrasive feed rate	Water pressure [MPa]	Water flow rate [l/min]	Designed Pump spec. [Hp], safety factor: 1.5~2																			
A	0.25 [traverse speed 40 mm/s for 3.5m TBM]	0.5~1.0	10 cm [focusing tube 0.229 cm 사용]	8.4 kg/min (#40 garnet)	180 (+ 0.8)	20.9 [orifice 0.04 inch 사용]	84 [100]"																			
B	0.50 [traverse speed 80 mm/s for 3.5m TBM]	0.5~1.0	10 cm [focusing tube 0.229 cm 사용]	10.5 kg/min (#40 garnet)	285 (+ 10.0)	28.3 [orifice 0.04 inch 사용]	177 [200]"																			
- 워터젯 시스템 설계안 검토 및 보완	- 암반지역 급곡구간 적용성 예비검토 - 워터젯 시스템 설계안 보완	- 급곡구간 적용성 예비검토를 위해 굴진율에 따른 절삭중복 효과를 분석하여 설계안에 보완. 현장 적용시 고려사항 보완. - 전체 워터젯 시스템 최종 설계안 도출.																								

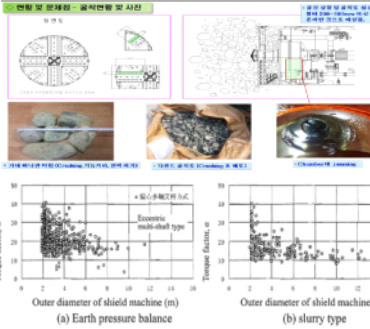
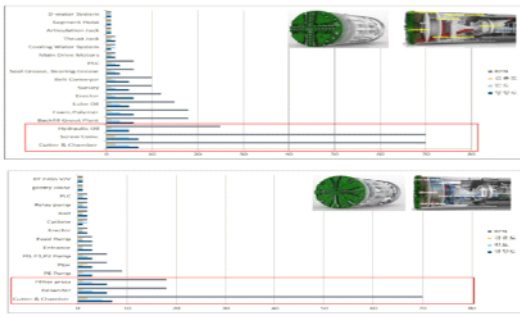
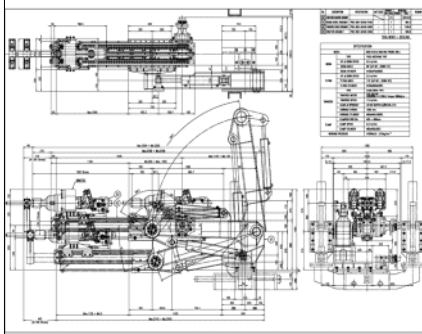
아. 특수지반 분류 및 쉘드 TBM 효율적 통과기법 개발 (서울대학교 산학협력단)

세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
- 특수지반 분류체계 제안	- 쉘드 TBM 특수지반 국내외 시공사례를 조사하여 특수지반에 대한 분류체계를 제안함 - 특수지반 쉘드 TBM 시공시 나타나는 문제점과 일반적인 보강개념에 대하여 검토함	- 특수지반 분류체계 제안 내용 • 쉘드 TBM 시공 시 고려될 수 있는 특수지반을 총 11개 지반조건으로 분류하고 공동구의 설치환경을 고려, 다시 4가지로 특수지반(복합지반, 호박돌층, 단층파쇄대, 고수압층)을 분류하였음. • 11개 특수지반에 대하여 기존의 분류/탐사기법의 적용성을 평가함. • 분류된 특수지반에서의 시공 시 나타나는 문제점과 보강대책을 제시하였음.
- 특수지반 절삭 특성 평가	- 그라우팅 보강된 호박돌층에 대한 절삭특성 평가 • 그라우팅의 보강강도에 따른 절삭특성 • 자갈의 크기, 강도에 따른 절삭특성 • 절삭조건에 따른 절삭특성	- 특수지반 절삭시험 결과 요약 • 그라우팅재의 강도, 압입깊이에 따라서 호박돌의 절삭형태는 Pushing, scratching, splitting, breaking의 네 가지로 구분됨. 호박돌의 효율적인 굴착을 위해서 요구되는 그라우팅재의 강도는 호박돌의 강도대비 약 1/190인 것으로 분석됨. • 자갈을 절삭할 때, 커터 작용력의 특성으로는 ①수직력은 급격히 증가, ②회전력은 발현되지 못함, ③측력이 크게 증가함. 자갈 및 호박돌의 굴착 시, 추력에 지배적인 영향을 받으며, 커터의 편마모와 편심력에 대한 검토가 중요함을 의미.
- 특수지반 쉘드 TBM 급속 시공 매뉴얼 개발	- 특수지반 쉘드TBM 급속시공 매뉴얼 제시 • 특수지반 분류체계 • 특수지반에서의 시공상 문제점 및 대책 • 특수지반의 보강 방법 • 특수지반 시공 시 제안사항	- 특수지반 쉘드TBM 급속시공매뉴얼 내용 요약 • 서론: 매뉴얼의 배경, 범위, 용어 • 특수지반 정의: 개요, 분류체계 • 급속시공관리방안 개요 • 지반조사 기법:물리탐사, 시추코어 등 • 특수지반 보강:보강공법, 보강영역 • 장비선정: TBM, 커터, 보강장비 • 특수지반에서의 시공 시 고려사항 • 국내외 특수지반 시공 사례검토

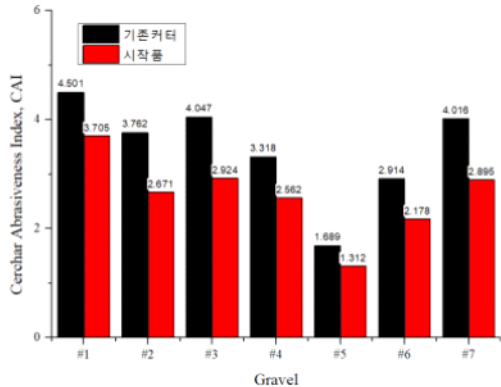
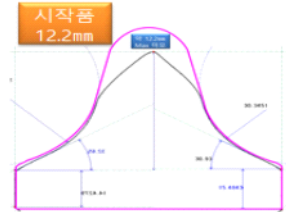
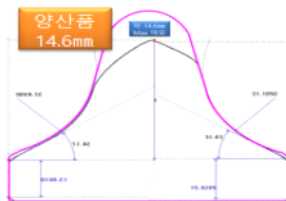
자. 특수지반 최적보강 설계기준 및 시방서 제안 (주)수성엔지니어링)

세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
- 특수지반의 보강 문제점 및 대책 검토	- 특수지반에 대한 국내·외 기준서(설계기준 및 시방서) 검토 - 특수지반 시공사례 검토 - 국내·외 쉘드 TBM 트러블 사례분석	- 국내·외 설계 기준서 및 시공(보강)사례 검토 보고서 • 국내·외 기준서 검토와 특수지반 현황 및 TBM 통과방안에 대한 사례검토 완료
- 보강사례를 통한 특수지반별 통과방안 분석	- 특수지반 보강영역 적용사례 검토 - 특수지반 CASE별 지반특성치 선정	- 보강사례를 통한 특수지반별 통과방안 분석 보고서 • 5차년도 수치해석을 위한 국내 설계 적용 지반특성치를 20여 개소 이상 분류 및 검토하여 적절한 지반특성치 선정 
- 수치해석을 통한 보강공법 영역제안 및 보강 적정성 검토	- 특수지반 수치해석을 통한 최적보강방안 및 영역분석 • 수치해석 분석조건 검토 • 특수지반 굴착중 지반침하 및 주변영향 분석 • Trouble(막장보강, 커터교환 등)을 고려한 지반보강 및 차수보강 분석	- 특수지반 최적보강 설계매뉴얼 

차. 특수지반 쉴드 TBM 최적운용조건 및 장비산정 기법 개발 (주)동아지질)

세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
특수지반 쉴드 TBM 최적 운용조건 및 장비선정 기법 개발	국내·외 쉴드 현장 특수지반 및 트러블 지층 굴진자료 수 집 및 분석 쉴드TBM 주요장비 사양 분 석 및 산정식 검토 특수지반 쉴드TBM운용시 발 생한 Downtime 요인 및 분 석 	특수지반 쉴드TBM 최적운용조건 및 장비선정 기법 개발 결과 - 국내·외 특수지반 쉴드TBM 현장 10개소 굴진자료 분석 및 결과정리 - 쉴드TBM EPB Type 4기, Slurry Type 4기 사양 및 산정식 결과정리 - 특수지반 쉴드TBM 기계적 리스크 요인 인자도출 
쉴드 TBM Probe drill 개발	쉴드TBM용 Probe drill 개발 - 드릴링 및 보링 성능 향상 - 세부각도 조절 및 Extension 기능으로 Probe drill 각도조절 개선 	쉴드TBM용 Probe drill 개발결과 - Probe drill 시제품제작 완료 - Probe drill Percussion, Torque 성능 향상 및 각도조절로 작업성능 향상 - Probe drill 특허등록 완료 (TBM용 프로브드릴 어셈블리) 

카. 특수지반용 고성능 디스크커터 개발 (㈜진성티씨)

세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과																																																																																
- 디스크 커터링 신소재 개발	- 내마모 및 내충격성을 겸비한 신소재의 합금 조성에 따른 성능 검증 - 최적의 성능을 갖는 신소재로 제작된 커터링의 성능 검증  - 시제품 디스크 커터의 특수지반 절삭시험 및 세르샤 마모시험 비교  - 디스크 커터의 현장 검증 양산품(#23) 장착  시제품(#24) 장착 	- 최적 성능의 합금조성 성분도출 <table><tr><th></th><th></th><th colspan="3">탈레일 조건 #1</th><th colspan="3">탈레일 조건 #2</th></tr><tr><th></th><th></th><th>경도 (HRC)</th><th>충격 (J)</th><th>Wear loss (mm)</th><th>경도 (HRC)</th><th>충격 (J)</th><th>Wear loss (mm)</th></tr><tr><td>#1</td><td>연성 ↑</td><td>58</td><td>24</td><td>0.1319</td><td>58</td><td>33</td><td>0.1374</td></tr><tr><td>#2</td><td>경도 ↑</td><td>58</td><td>35</td><td>0.1781</td><td>58</td><td>33</td><td>0.1617</td></tr><tr><td>#3</td><td>내마모 ↑</td><td>57</td><td>19</td><td>0.1820</td><td>56</td><td>27</td><td>0.1481</td></tr><tr><td>#4</td><td>내마모 ↑</td><td>55</td><td>30</td><td>0.1814</td><td>55</td><td>47</td><td>0.1790</td></tr><tr><td>#5</td><td>연성 ↑</td><td>57</td><td>21</td><td>0.1845</td><td>57</td><td>25</td><td>0.1993</td></tr><tr><td>#6 STD11</td><td>양산</td><td>59</td><td>2</td><td>0.1938</td><td>61</td><td>2</td><td>0.2030</td></tr><tr><td>#7 STD61</td><td>양산</td><td>53</td><td>34</td><td>0.1781</td><td>55</td><td>33</td><td>0.1763</td></tr><tr><td>#8 테더벨</td><td>생물</td><td>57</td><td>16</td><td>0.1819</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr></table> - 세르샤 마모시험 결과 우수  - 현장 검증 결과 우수 시작품 12.2mm  양산품 14.6mm 			탈레일 조건 #1			탈레일 조건 #2					경도 (HRC)	충격 (J)	Wear loss (mm)	경도 (HRC)	충격 (J)	Wear loss (mm)	#1	연성 ↑	58	24	0.1319	58	33	0.1374	#2	경도 ↑	58	35	0.1781	58	33	0.1617	#3	내마모 ↑	57	19	0.1820	56	27	0.1481	#4	내마모 ↑	55	30	0.1814	55	47	0.1790	#5	연성 ↑	57	21	0.1845	57	25	0.1993	#6 STD11	양산	59	2	0.1938	61	2	0.2030	#7 STD61	양산	53	34	0.1781	55	33	0.1763	#8 테더벨	생물	57	16	0.1819	-	-	-
		탈레일 조건 #1			탈레일 조건 #2																																																																													
		경도 (HRC)	충격 (J)	Wear loss (mm)	경도 (HRC)	충격 (J)	Wear loss (mm)																																																																											
#1	연성 ↑	58	24	0.1319	58	33	0.1374																																																																											
#2	경도 ↑	58	35	0.1781	58	33	0.1617																																																																											
#3	내마모 ↑	57	19	0.1820	56	27	0.1481																																																																											
#4	내마모 ↑	55	30	0.1814	55	47	0.1790																																																																											
#5	연성 ↑	57	21	0.1845	57	25	0.1993																																																																											
#6 STD11	양산	59	2	0.1938	61	2	0.2030																																																																											
#7 STD61	양산	53	34	0.1781	55	33	0.1763																																																																											
#8 테더벨	생물	57	16	0.1819	-	-	-																																																																											

- 플로팅 씰
오링 연구에
따른
디스크커터
내부 설계

- 오링 재질에 따른 성능 비교
평가 분석

- 플로팅 씰 및 커터링 변경에
따른 최적의 디스크커터 설계
및 시제품 제작

- 최적 성능의 오링 선정

시험 항목 명목	NBR 01	NBR 02	HNBR	VMQ	FKM
단단시점					
안장강도 (MPa)	9.2	13.0	20.5	7.4	11.1
연신율 (%)	270	240	410	290	110
경도 (90)	60	67	74	70	70
영구압축률 (120°C, 70%)	18	19	75	10	9
노화시험 (120°C, 70%)					
경도변화 (%)	5	3	3	1	0
안장강도변화율 (%)	21.3	17.3	17.3	7.1	-0.7
연신율 변화율 (%)	-4.8	1.5	-13.4	5.3	6.5
경도변화 (%)	0	3	9	-2	0
내열시험 (120°C, 70%, ASTM No.3 Oil)					
안장강도변화율 (%)	26.1	16.6	17.8	5.9	4.1
연신율 변화율 (%)	-4.0	1.8	-18.8	2.0	8.4
경도변화율 (%)	-1.2	-4.2	-6.3	3.8	0.4
내열시험 (120°C, 70%, ASTM No.1 Oil)					
경도변화 (%)	-12	-7	6	-14	0
안장강도변화율 (%)	-3.4	-2.9	17.1	1.9	-4.9
연신율 변화율 (%)	-7.7	-1.9	-22.9	-4.5	1.0
경도변화율 (%)	26.6	13.3	0.1	23.5	0.8

- 최적의 설계에 준하는 시제품 제작

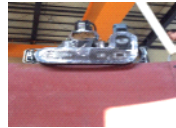
타. 소단면 터널식 공동구 시공기술에 의한 소단면 터널식 공동구 성능 검증 시설 개발 (한국과학기술원)

세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
- 소단면 TBM 실대형 성능검증 시설 구축	- 소단면 TBM 실대형 성능검증을 할 수 있는 실험동 및 지원동 설계 및 시공 - 소단면 TBM 실대형 성능검증을 할 수 있는 지상굴진시험장비 설계 및 제작 	- 소단면 TBM 실대형 성능검증 시설 구축 • 소단면 TBM 실대형 성능검증을 할 수 있는 실험동 구축(깊이 10m, 굴진가능거리 15m 지하토조 및 3m 굴진가능한 허용추력 8000 kN의 소단면 TBM 실대형 굴진시험 지상장비, 50/30ton 겐트리 크레인) • 실험지원동 구축 (실험데이터 분석실, 워터젯실, 자재창고) 

3. 공동구용 수직구 급속시공을 위한 저소음/무진동 시공시스템, 보강/차수 기술 개발

가. 지반 변위와 지하수 유출을 방지하는 수직구 외주면 급속굴착 (1m/day) 기술 및 장비 개발 (한국과학기술원)

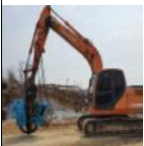
세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
- 외주면 굴착장비 최적 설계를 위한 지반 안정성 검토	- 굴착장치 관입깊이-지반별 안정성/차수성 검토 - 최적 관입깊이-장비규모 선정	- 지반별 안정성 검토 결과 • 보일링 및 배수량 고려 케이스 검토결과 사질토의 차수 미적용시 외주면 굴착기 근입깊이는 18m 이상 필요하나 그라우팅 적용시 0.5D 면 충분
- 급속 라이닝 외주면 굴착장비 모형 제작	- 굴착장치 특허 출원 - 외주면 굴착장비 부재응력 검토 - 모형시험 토조 제작	- 외주면 굴착장비 축소모형 3D 프린터 설계 및 축소모형 제작 - 토압/추진력 부재력 응력 검토 결과 • 프레임 두께 10mm 이상 설계 시 부재력 및 모멘트 허용치 만족
- 실내시험에 의한 굴착공법 안정성 분석	- 원심모형시험 수행 • 관내토의 유무에 따른 히빙 규모 분석 및 주변지반 거동 분석	- 원심모형시험을 통한 관내토의 히빙 및 주변지반 거동 분석 • 0.5D 관내토가 히빙에 대한 효과적 억제 효과를 가짐을 확인함
- 장비모형/굴착기준 개발	- 굴착장비 모형을 활용한 실내시험 수행을 통해 굴착 최적 효율 및 설계 수정 보완사항 도출 - 원심모형시험 결과에 대한 수치해석 수행 및 결과 분석	- 축소모형 시험을 통해 외주면 굴착장비를 이용한 최적 굴착공정 확립 - 수치해석적 연구를 통한 최적 관내토 산정식 제안
- 급속라이닝 외주면 굴착장비/제어시스템 일부 제작, 연구내용 논문 게재	- 외주면 굴착장비 및 제어시스템 일부 제작 - 외주면 굴착장비 통합 제어용 컨트롤 패널 제작 - 무부하 시험을 통한 굴착장비 성능 보완 및 제어시스템 최적화	- 시제품 일부(25%) 제작 완료 - 연구논문 2편 게재 완료 

- 굴착장비-제어시스템 연동 기술검증 보고서	- 외주면 굴착장비 무부하시험을 통한 장비-제어시스템 연동 기술에 대해 검증	- 실제 장비 구동 시 장비와 제어시스템 연동 및 컨트롤러 확인을 위한 무부하시험을 수행, 연동 기술에 대한 검증 완료하였으며 검증 보고서 작성완료함.
- 외주면 굴착장비 실대형 성능검증 시험 (굴착속도)	- 공동구 연구단 실대형 성능검증센터 시설을 활용, 1개 모듈을 이용한 굴착모사시험 수행함. - 제작된 장비의 원활한 구동 및 굴착속도 검토	- 굴착시험 수행 결과, 목표 굴착속도(1 m/day)의 약 19배에 달하는 19.2 m/day의 굴착성능을 확인하였음. 
- 급속라이닝 외주면 굴착기술 기술이전	- 외주면 굴착장비 수정보완 - 암반 굴착기와의 연계 시공 방안 보고서 작성 - 급속라이닝 외주면 굴착기술 기술이전	- 실대형 시험 결과를 바탕으로 외주면 굴착장비 수정보완 및 제어시스템 보완 - 암반 굴착기와의 연계 시공 설계안 및 보고서 작성 - 수직구 외주면 굴착공법 및 장비 기술이전

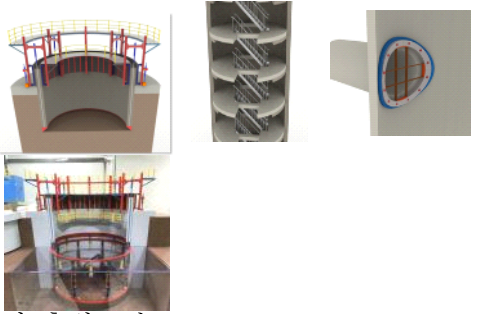
나. 지반 변위와 지하수 유출을 방지하는 수직구 외주면 굴착 장비 개발
(㈜에이치비씨)

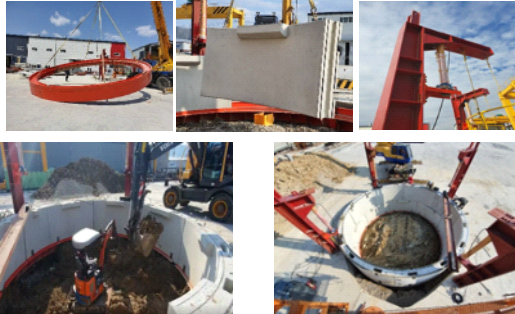
세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
- 급속 라이닝 외주면 굴착장비 모형 제작	- 굴착장치 특허 출원 - 외주면 굴착장비 부재응력 검토 - 모형시험 토조 제작	- 외주면 굴착장비 축소모형 3D 프린터 설계 및 축소모형 제작 - 토압/추진력 부재력 응력 검토 결과 • 프레임 두께 10mm 이상 설계 시 부재 력 및 모멘트 허용치 만족
- 장비모형/굴착 기준 개발	- 굴착장비 모형을 활용한 실 내시험 수행을 통해 굴착 최 적 효율 및 설계 수정 보완사 항 도출 - 원심모형시험 결과에 대한 수치해석 수행 및 결과 분석	- 축소모형 시험을 통해 외주면 굴착장비 를 이용한 최적 굴착공정 확립 - 수치해석적 연구를 통한 최적 관내토 산정식 제안
- 굴착장비-제 어시스템 연동 기술검증 보고서	- 외주면 굴착장비 무부하시험 을 통한 장비-제어시스템 연 동 기술에 대해 검증	- 실제 장비 구동 시 장비와 제어시스템 연동 및 컨트롤러 확인을 위한 무부하 시험을 수행, 연동 기술에 대한 검증 완 료하였으며 검증 보고서 작성완료함.
- 외주면 굴착장비 실대형 성능검증 시험(굴착속도)	- 공동구 연구단 실대형 성능 검증센터 시설을 활용, 1개 모듈을 이용한 굴착모사시험 수행함. - 제작된 장비의 원활한 구동 및 굴착속도 검토	- 굴착시험 수행 결과, 목표 굴착속도(1 m/day)의 약 19배에 달하는 19.2 m/day의 굴착성능을 확인하였음. 

다. 저소음/무진동 암반지반 급속굴착(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발
(㈜제영이엔씨)

세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
저소음/무진동 수직구 내 암반지반 굴착장비 설계	- 장비 설계를 위한 개념 정립 - 저소음/무진동 굴착장비 설계도 제작	- 국내외 선행기술 및 문헌 조사를 통해서 요소기술을 도출 - 워터젯 천공 및 할암, 굴착장치의 집게형 굴삭기 결합에 의한 장비 일원화로 시공성, 경제성 향상 가능 - 장비 구성요소 도출 - 특허출원(할암장치 10-2016-0039012)
- 암반지반 급속굴착 장비모형/굴착기술 개발 - 실내시험을 통한 천공부/할암부 굴착기술도출	- 실내시험을 통한 천공부/할암부 굴착 방법/기술 도출 - 저소음/무진동 암반굴착 천공부 /할암부 핵심 단위요소 제작 - 저소음/무진동 암반 굴착 핵심 단위요소 설계보강  	- 천공부 핵심단위요소 설계 - 각 유량별, 압력별, 분사 각도별 노즐 시스템 제작 - 천공부 외경별 노즐시스템 제작 - 시제품 디자인 모형제작 - 실내 시험데이터를 이용하여 할암부 설계 보강 및 제작 - 암반 자유면 형성시험 - 할암부 설계보강, 할암부 제작 - 특허등록(할암 장치 10-1803452) 
암반굴착장비 시제품 제작	- 암반굴착장비 단위요소 및 시제품 일부 제작 - 암반굴착장비 제어시스템 구  	- 저소음/무진동 암반 굴착 할암부 핵심단위요소 설계보강 - 시제품 단위요소 제작 - 시제품 버켓부 설계보강 - 암반굴착자이 제어시스템 구성 및 설계 - 특허등록(암반굴착장치 10-1858060) 
시제품 제작 및 성능시험 (60db,무진동)/테스트베드	- 굴착장비 시험 및 설계 보강을 통하여 시제품 제작 - 성능검증 시험 - 테스트베드 /굴착공법 매뉴얼	- 시제품 제작 - 천공,할암,절삭, 상차집게 연동시스템 구성 - 성능시험 결과, 굴착 성능 50m³/day와 60dB이하, 무진동 확인 - 테스트베드/굴착공법 매뉴얼 - 특허등록(암반급속굴착을위한 일체형 구조를 갖는 굴착장치 10-1803452)    

라. 공동구용 수직구 하향식 라이닝 현타 급속(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발 (주네오시티)

세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
- 공동구용 수직구 하향식 라이닝 시공 사례 조사/분석	- 국내외 기술 동향 조사	- 국내 외 기술 분석결과 제시 • 국내 외 수직구 하향식 굴착 공법 사례 조사 • 국내 외 수직구 하향식 굴착 공법 경제성 비교 분석
- 수직구 하향식 급속성형장치 공법 개발 - 수직구 구조물 슬래브/계단/접속 개구부 설계 - 수직구 수평터널 연결부 성형장치 설계	- 하향식 급속성형장치 시공공법 개발 • 하향식 급속 성형장치의 3D 모델링 및 부분모형제작 - 수직구 구조물 슬래브/계단/접속 개구부 설계 및 3D 모델링 - 수직구 수평터널 연결부 성형장치 설계 및 3D 모델링	- 하향식 급속 성형장치 공법 개발방향 설정 • 3D 모델링 및 제작 설계도면 작성 및 목업 - 수직구 구조물 슬래브/계단/접속 개구부 3D 모델링 - 수직구 수평터널 연결부 성형장치 설계 및 3D 모델링  - 특허 출원 2건
- 수직구 하향식 급속 성형장치 시제품 부분 제작 - 수직구 수평터널 연결부 성형장치 시제품 부분 제작	- 하향식 성형장치 3D 리모델링 - 하향식 급속 성형장치 부분 시제품 제작 - 콘크리트 최적배합 개발 - 수직구 수평터널 연결부 성형장치 부분 제작 - 수직구 구조물 슬래브/계단/접속 개구부 설계 매뉴얼	- 수직구 하향식 성형장비 시제품 제작 • 상부에서 유압장치가 설치되어 하부로 밀어주는 가설구조로 제작 • 유압장치와 하부에 연결되어있는 작업대 공간까지 제작 완료 • 콘크리트 탈형강도 시험 - 매뉴얼 제작 1건 (직구 구조물용 설계 매뉴얼) - 특허출원 2건 (10-0135111, 10-0156250) 

- 수직구 하향식 급속 성형장치 부분 성능 검증	- 내경 $\phi 8\text{m}$ 기준(시공 속도 1m/day) 급속 성형장치 시제품 부분제작 - PC 중공형 하향식 연결부 구조물 제작 - 공기단축을 위한 콘크리트 타설 및 철근조립 절차수립 - 현장시험을 위한 시공 진행 - 몰드 제작 및 구조계산 - 수직구 PC 구조물공 작성	- 하향식 급속 성형장치의 현장 성능검증 • 각 시제품들의 현장 테스트베드 • 매뉴얼 제작 1건 (수직구 구조물 설계 매뉴얼) - 특허등록 2건 (10-2001526, 10-2026112) 
- 공동구용 수직구 하향식 라이닝 현장 타설 급속 시공기술 및 장비 실험 성능 검증시험	- 내경$\phi 8\text{m}$,외경$\phi 8.8\text{m}$, 심도3.3m 기준으로 급속 성형장치 실험형 성능 검증 - 개선된 중공형 PC 세그먼트 몰드 제작 및 구조계산 - 중공형 PC 개선 매뉴얼 작성 - 현장 시험을 위한 시공 진행	- 중공형 PC 세그먼트 보완 수정진행 • 설계 변경을 통한 조립 및 작업효율성 증진 (두께0.4m, 높이1.65m) - 수직구 하향식 라이닝 현장 타설 급속 장비 설치 및 진행 • 선단부 하부 슈 설치 및 중공형 PC 세그먼트 장착  - 매뉴얼 1건 제작 (중공형 PC 세그먼트 변경) - 특허등록 1건 (수직구 구조물의 수평터널 연결부 성형장치 10-2102593)
급속외주면 굴착 기술 이전 및 자체실시 계약	- 한국과학기술원의 급속 외주면 굴착 기술 이전 - 자체실시계약(진흥원) 체결	- 테스트베드 수행결과, 목표 시공 속도(1m/day)의 약 2배에 달하는 2.2m/day (하루 8시간 작업기준) 시공속도를 확인 하였음. - 수직구 외주면 급속 굴착 기술과 하향식 라이닝 현장타설 급속 기술과의 연계에 대한 후속 진행 -진흥원과의 자체실시계약 체결 완료

마. 공동구용 수직구 접속부 보강/차수 장치 개발 (㈜세니츠코퍼레이션)

세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
- 요소기술 조사 및 분석, 직경별/시공심도별 상대변위 분석	- 요소기술 조사 및 분석	- 구조물 상대변위 영향인자 조사 상대변위 검토를 위한 대표 영향인자 선정(시공심도, 구조물 제원, 재료 물성치, 지반 및 지진과 조건, 구조물-지반 접속부 경계조건)
	- 직경별/시공심도별 상대변위 분석	- 시공심도 20m의 풍화토 지반에서 접속부 변위 20mm 발생 접속부 보강/차수장치의 변위 수용범위를 20mm로 설정
- 차수장치 설계	- 터널-수직구 접속부 차수장치 설계	- 터널-수직구 접속부 차수장치 기초설계 및 상세설계 수행 - 차수장치 설계도면 작성 - 디자인 목업 및 워킹 목업 제작 - 차수장치 시제품 구조검토 - 내진특등급(0.3g) 적용 시에도 최대 응력은 77.24N/mm^2으로 홀더링의 파단강도인 400N/mm^2 보다 작게 분석되어 차수장치는 안전함
- 차수장치 시제품 제작	- 차수장치 시제품 제작	- 실증시험을 위한 Ø1.0m 규모의 차수장치 시제품 제작(기본형(평면형)) Ø3.5m 규모의 시제품 제작 (곡률형(특수형))
- 시제품 실험대형 성능검증	- 상대변위 흡수율 및 차수율 검토	- 공인인증기관을 통한 시험성적서 확보 - 최대 변위량 : 20mm (상대변위 흡수 20mm 달성) - 장치 내부에 물을 가득 채운 상태에서 20시간 이상 유지 후 누수 없음 - 장치 내부에 물을 가득 채운 상태에서 유압 3 bar 적용, 2시간 유지 후 누수 없음(차수율 100%(심도 20m 이상) 달성)
- 테스트베드	- 테스트베드 적용을 통한 접속부 차수장치 성능검증	- 민간건설현장 섭외 후 현장 여건에 적합한 접속부 차수장치 설치 현장 설치 후 차수장치 누수 없음

바. 공동구용 수직구 접속부 보강/차수 장치 개발 (UNSW)

세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
- 비시멘트 바이오폴리머 기반 재료 개발 - 바이오폴리머 재료 물성 및 유동학적 특성 개선	- 비시멘트 바이오폴리머 기반 차수재 개발 - 10-8m/s 이하 차수성을 나타내는 친환경 바이오 차수재 개발 및 재료 보완 - 차수재 시제품 제작	- 지반 내 유효응력과 수압조건을 모사할 수 있는 실내시험 장치 고안 및 제작, 다양한 조건에서 바이오폴리머의 차수성능시험 수행/ SCI급 논문으로 검증 - 실내투수시험(ASTM 표준규격)에 기반한 비시멘트 바이오폴리머 기반 재료 개발/ SCI급 논문으로 검증
- 바이오폴리머 주입성능 및 차수특성 평가용 실증 실험	- 수직구 주변 지반의 차수재 시공 시 효과적 처리가 가능하도록 하는 바이오폴리머 주입 성능 분석용 Linear injection test 설계 및 수행	- 주입압력과 주입 속도, 주입 거리간의 상관관계 도출 - 바이오 차수재의 높은 점성으로 인해 농도가 높을수록 주입 성능이 낮아지며 따라서 더 높은 압력이 필요함. - 바이오 차수재 농도 증가에 따라 유체 속도가 감소하는 경향을 보임.
- 수직구 보강/차수를 위한 비시멘트 바이오폴리머 차수재 성능 검증	- 바이오폴리머 슬러리의 주입성능 및 거동특성(차수성능)평가 - 바이오폴리머 처리 지반-구조물 간 마찰특성 파악 - 공인 토질 투수시험을 통한 차수성 공인시험성적서 획득	- 특정 주입압력에서의 바이오폴리머 슬러리의 주입량이 10분 이내에 100 mm³ 이상의 주입량에 도달함을 확인 - 시공 중 마찰저감 기대효과 및 시공 후 강도/안정성 증진효과 기대할 수 있는 실험결과 확인 - 사질토내 주입시 2.2 x 10⁻⁹ m/s 차수성 검증

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 연구목표 달성도

가. 질적성과 달성도

(1) 연구단 총괄 질적성과 달성도

구분	핵심연구성과	단위성과물	질적성과지표	목표치	측정방법	달성치	해당기관
1-1a	도심지 공동구 수용시설별 설계용량 최적화 연구	터널식 공동구 설치 및 사업추진을 위한 따른 최적 설계 용량	현황 및 사례에 대한 기초조사	100%	조사 건수 확인	100%	한국토지주택공사 토지주택연구원
		건설기준 조사 및 분석을 통한 공동수용 충돌사항 조사 및 해결방안 도출	공동구관련 건설기준 조사	100%	개선방안 도출	100%	
			수용시설물별 분제점 및 분석	100%	문제 해결방안 도출	100%	
		도심지 소단면 공동구 활성화 정책/제도/사업추진 절차 등에 대한 개선방안 연구	공동구 활성화 방안 기초 조사	100%	기초모델 수립 여부	100%	
		도심지 소단면 공동구 활성화 정책/제도/사업추진 절차 등에 대한 개선방안 연구	공동구활성화방안중 지역별최적수용시설 항목분석	1건	항목분석및 대상지역선정	1건	
		도심지 소단면 공동구 활성화 정책/제도/사업추진 절차 등에 대한 개선방안 연구	공동구활성화방안중 설치가능규모별검토	1건	활성화 방안검토	1건	
1-1b	터널식 공동구 단면 최적화 설계법	도심지 소단면 공동구 활성화 정책/제도/사업추진 절차 등에 대한 개선방안 연구	활성화방안 Test-bed 검증	1건	테스트베드 적용건수	1건	(주)대정 건설턴트
		국내외 터널식 공동구 단면 적용사례 및 배치기준 분석	해외 터널식 공동구 적용사례 조사 및 국내외 공동구 단면 설계 및 배치기준 분석	100%	사례제시 및 기준분석 여부	100%	
		터널식 공동구 최적단면 설계기법 연구	내공단면결정을위한 세부설계항목개발(공동구내공치수,수용시설별점유공간등)	4건	가이드라인내 단면설계항목 도출건수	4건	
1-1c	도심지 유형별 공동구 설치 타당성 평가시스템	터널식 공동구 단면설계 매뉴얼 개발	터널식공동구단면설계매뉴얼개발	1건	매뉴얼제시건수 (시설별점유 공간, 조합수용기법 원형단면배치 기법등제시)	1건	(주)한국종합기술
		도심지 유형별 공동구 유형에 따라 세분화된 타당성 평가시스템	유형별 평가시스템의 세분화	100%	유형별 평가지표 설정	100%	
		도심지유형을 고려한 평가 모델의 AHP분석 및 가중치 설정	AHP분석 및 가중치 설정	100%	평가지표항목의 가중치	100%	
		도심지 유형을 고려한 평가지표 항목별 정량적 평가방법	항목별 정량적 평가방법	1건	정량적 평가방법 제시	1건	

구분	핵심연구성과	단위성과물	질적성과지표	목표치	측정방법	달성치	해당기관
		도심지 유형을 고려한 타당성평가시스템 및 프로그램 개발	타당성 평가 프로그램 모듈 개발	70%	S/W 개발	70%	
		도심지 유형을 고려한 타당성평가시스템 및 프로그램 개발	프로그램 검증을 위한 현장 적용(Test-bed)	100%	S/W 개발	100%	
1-1d	도심지 터널식 공동구 설치에 위한 LCC 표준공정 및 공사비 관리시스템	도심지 터널식 공동구 LCC 시스템	자료수집/현황조사 및 기초모델 수립	100%	조사건수 확인 및 기초모델 확인	100%	유니콘스(주)
		도심지 터널식 공동구 표준공정 및 공사비 관리시스템	자료수집/현황조사 및 기초모델 수립	100%	조사건수 확인 및 기초모델 확인	100%	
		경제성 평가를 위한 LCC 평가 시스템	경제성 분석 기초 모델 수립	100%	기초모델제시	100%	유니콘스(주)
			경제성 분석 상세 모델 수립	100%	상세모델제시	100%	
		경제성 평가를 위한 LCC 평가 시스템	경제성 분석 통합모델 수립	100%	모델제시	100%	
			경제성 평가 매뉴얼 개발	100%	매뉴얼제시	100%	
		LCC 표준공정 및 공사비 관리 시스템	공동구 형식별 개략 공사비 산정과 적정 공기 분석 방법 제시	1건	모델제시	1건	
			공사비/공정 분석 매뉴얼 개발	1건	매뉴얼 제시	1건	
		LCC 표준공정 및 공사비 관리 시스템	LCC 표준공정 및 공사비 관리시스템 프로그램 개발	70%	S/W 개발	70%	
		LCC 표준공정 및 공사비 관리 시스템	프로그램 검증을 위한 Test-bed	100% 1건	S/W 개발	100% 1건	
1-2a	글로벌 표준화 설계요소기술 개발 및 최적 설계기준	개발된 공동구 설계법의 설계기준	한계상태 설계기준의 연구방향 확립	100%	연구방향 확립확인	100%	한국건설 기술연구원
		하중 및 저항치의 통계적 특성치 구축, 한계상태 방정식의 정의	대상 구조물 선정 및 자료수집 수집된 자료의 통계적 분석 및 평가	100%	전산해석 프로그램	100%	
		한계상태방정식의 정의(2) 및 각 설계기준별 설계수준목표신뢰도 지수검토	한계상태방정식의 정의	100%	한계상태, 하중조합, 계수 등 선정	100%	
			각 설계기준별 설계수준목표신뢰도 지수검토	100%	설계기준에 대한 비교 분석	100%	
		목표신뢰도지수 결정 및 하중조합에 따른 파괴확률 산정	목표신뢰도지수제시	$\beta=3.0-3.5$ 구간 검토	검토건수	1건	
			하중조합에 따른 저항 계수(안) 및 하중계수(안) 각각 제시	2건	하중/저항 계수 도출 건수	2건	
		최종 목표신뢰도 지수 및 최종 하중계수/저항계수 제시	신뢰성 해석을 통한 최종 목표신뢰도 지수(안) 제시	1건	목표신뢰도 지수 제시 건수	1건	
			최종 하중/저항계수(안) 제시	2건	하중/저항 계수 도출 건수	2건	
		터널식 공동구 한계상태 설계기준(안)	터널식 공동구 한계상태 설계기준(안) 제시	1건	설계기준(안) 제시	1건	
1-2b	한계상태 설계법에 의한 터널식 공동구 라이닝 설계기술	터널식 공동구 설계기준 분석	자료수집	100%	자료 수집 건수 확인	100%	(주)평화엔지니어링
		한계상태 설계법에 의한 설계법 비교	설계법 비교 및 설계항목 비교	100%	설계비교 확인	100%	
		한계상태 설계법을 적용한 설계조건별	설계조건별 수치해석에 의한	100%	수치해석을 통한	100%	

구분	핵심연구성과	단위성과물	질적성과지표	목표치	측정방법	달성치	해당기관
		수치해석에 의한 구조해석 비교검토	비교검토		비교분석 제시여부		
		설계조건별 수치해석 비교검토 결과를 고려한 예비설계	세그먼트 라이닝의 한계상태설계법에 의한 예비설계	1건	예비설계에 대한 설계법별 구조설계 결과 비교	1건	
		한계상태설계법에 의한 구조해석 절차 정립	터널식 공동구 라이닝의 한계상태설계법에 의한 구조해석 절차정립	1건	설계 항목별 구조 해석 설계절차 제시	1건	
		한계상태 설계법에 의한 터널식 공동구 라이닝 설계매뉴얼 제시 및 현장 적용	터널식 공동구 라이닝의 한계상태설계법에 의한 설계매뉴얼 제시	1건	설계매뉴얼 제시	1건	
1-2c	터널식 공동구의 한계상태 터널설계를 위한 지반정수 평가기법	국내 지반특성을 고려한 설계값 산정 기법 및 절차	선행연구및선진사례	100%	조사 건수 확인	100%	(주)희송지오텍
		글로벌 표준화 설계법 적용을 위한 국내 지반특성값 평가기법 개발	지반특성값(하중 및 저항요소)의 확률분포합수 평가	100%	확률평가모델 제시여부	100%	
		국내 지반특성을 고려한 지반특성값 산정 기법 및 절차	글로벌표준화설계법 적용을 위한 지반특성값 결정 표준절차 지침	100%	표준절차지침서 제시 여부	100%	
			글로벌표준화설계법 적용을 위한 지반특성값 결정 프로그램	100%	프로그램 등록 여부	100%	
		국내 지반특성을 고려한 지반특성값 산정 기법 및 절차	글로벌표준화설계법 적용을 위한 지반특성값 결정 표준절차 지침	1건	발간건수	1건	
			글로벌표준화설계법 적용을 위한 지반특성값 결정 프로그램	1건	S/W 등록여부	1건	
		국내 지반특성을 고려한 지반특성값 산정 기법 및 절차	글로벌표준화설계법 적용을 위한 지반특성값 결정 표준절차 지침 보완	1건	개발건수	1건	
1-2d	글로벌 표준화 설계법 적용을 위한 내진해석 및 내진설계 기술개발	국내외 공동구 내진해석/설계법 분석 및 목표신뢰도지수 산정	지진시 파괴확률 및 목표신뢰도지수	$\beta=2.0-3.0$ 구간 검토	검토건수	1건	(주)우성디앤씨
		공동구의 구조안전성 확보와 경제성 설계를 위해 목표신뢰도지수의 적정성 검토	구조안전성 및 경제성을 고려한 내진설계법과 설계기준(안)	2개국 이상	$\beta=2.0-3.0$ 구간상의 최적목표치 검증, 해외기준(2개국 이상)과 비교 검토	2개국 이상	
		글로벌표준화 설계법(LSD)에 기초한 내진설계법의 설계기준 검증/보완	터널식 공동구 한계상태설계기준(내진설계편)(안) 제시 (설계기준(안) 제시)	1건	적용건수	1건	
1-3a	터널식 공동구 건설단계별 및 시공특성을 고려한 안전관리기준	소단면 터널식 공동구 공사 특성 파악	건설안전정보시스템의 취약공종 분석	100%	취약공종 분석 여부	100%	한국시설안전공단
		설계안전성 검토 제도 분석	관련법령 및 제도 분석	100%	관련법령 및 제도 분석 여부	100%	
		안전위험요인 발굴, 위험요인 분류 및 중요도 파악	안전위험요인 발굴, 위험요인 분류 및 중요도 파악 타당성 검토	100%	전문가 자문	100%	

구분	핵심연구성과	단위성과물	질적성과지표	목표치	측정방법	달성치	해당기관
		위험성 평가방법 개발 및 저감기법 개발	위험성 평가방법 및 저감기법 리스트	1건	개발건수	1건	
		안전관리기준, 설계안전성검토 매뉴얼(안)	건설단계별 안전관리 기준 및 설계안전성검토 작성을 위한 매뉴얼(안)	1건	매뉴얼(안) 발간건수	1건	
		공동구 건설공사 안전관리 업무 매뉴얼 및 건설안전 업무 실용화	공동구 건설공사 안전관리 업무 매뉴얼 및 건설안전 업무 실용화 보고서	1건	매뉴얼 및 보고서 건수	1건	
1-3b	터널식 공동구 건설단계별 및 시공특성을 고려한 안전관리기준	시공 중 재해 위험요인 발굴방안 마련	시공 중 발생가능 대형재해 정밀 분석	100%	대형재해 정밀 분석 여부	100%	인천대학교 산학협력단
			잠재적인 위험요인 분석	100%	잠재적인 위험요인 분석 여부	100%	
		시공 중 대형 재해 대응 방법론 개발	시공 중 재해 요인 분류 및 방법론개발	100%	전문가 자문	100%	
		도심지 소단면 터널식 공동구 시공 중 대형건설 재해 대응 기술 개발	시공 중 대형재해 위험요인을 기반으로 건설재해 대응 매뉴얼 초안 작성	1건	발간건수	1건	
		도심지 소단면 터널식 공동구 시공 중 대형건설 재해 대응 기술 개발	공동구 시공 중 안전관리 기준 및 대형 재해 대응을 위한 매뉴얼(안)	1건	매뉴얼(안) 발간건수	1건	
		도심지 소단면 터널식 공동구 시공 중 대형건설 재해 대응 기술 실용화	공동구 시공 중 대형 건설재해 대응 매뉴얼 및 실용화 보고서	1건	매뉴얼 및 보고서 건수	1건	
2-1a	지반조건별 TBM 굴진율제시	국내 지반에 적합한 TBM 굴진율 예측 모델	문헌조사를 통한 굴진율 영향인자조사	영향인자 도출	보고서	영향인자 도출 (100%)	한국전력공사 전력연구원
		지반조건별 굴진율 및 관련 영향인자 데이터베이스 구축	DB 구축	90% 이내	DB구축 유무	10개현장 이상 (100%)	
		통계분석을 통한 현장 굴진율 데이터 분석	TBM 굴진율의 정확성	오차율40% (±10%)	100 * (산정된 굴진율 - 실제 굴진율) / 산정된 굴진율 < 20% (±10%)	오차율20% (±10%)	
		통계분석을 통한 현장 굴진율 데이터 분석(II)	TBM 굴진율의 정확성	오차율30% (±10%)	100*(산정된 굴진율-실제 굴진율)/실제 굴진율<30%	오차율20% (±10%)	
		실대형검증을 통한 굴진율 산정기법 검증	TBM 굴진율의 정확성	오차율20% (±10%)	100*(산정된 굴진율-실제 굴진율)/실제 굴진율<25%	오차율20% (±10%)	
		실대형검증을 통한 굴진율 산정기법 검증	TBM 굴진율의 정확성	오차율20% (±10%)	100*(산정된 굴진율-실제 굴진율)/실제 굴진율<25%	오차율20% (±10%)	
2-1b	소단면설드 TBM복합지반 (토사/암반지반) 실굴진율 예측모델및 프로그램	문헌조사를 통한 TBM 굴진율 산정 모델조사	문헌조사를 통한 TBM 굴진율 산정보델조사	3건 이상	조사 건수 확인	3건 이상	인하대학교 산학협력단
		회귀분석을 적용한 굴진율 예측모델 분석	다중회귀모델 구축 절차정립	1건	모델 구축 절차 보고서	1건	
		머신러닝기법을 적용한 설드TBM 굴진율 예측초기모델개발	다중회귀모델 예측 오차율	오차율 40%(+10%)	(예측값-측정값)/측정값*100 (%)	21.8%	
			적응형 뉴로-퍼지 추론시스템 알고리즘 및 모델구축 절차 정립	1건	모델 구축 절차 보고서	1건	
		머신러닝기법을 적용한 설드TBM	적응형 뉴로-퍼지 추론시스템	오차율 30%(+10%)	(예측값-측정값)/측정값*100 (%)	20.3%	

구분	핵심연구성과	단위성과물	질적성과지표	목표치	측정방법	달성치	해당기관
		굴진율 예측 프로그램 개발	예측오차율	%	00 (%)		
		현장적용을 통한 쉼트TBM 굴진율 예측프로그램 검증 및 업데이트	프로그램 예측 오차율	오차율 25%(+10%)	(예측값-측정값)/측정값*100 (%)	0.105	
		현장적용을 통한 쉼트TBM 굴진율 예측 프로그램 검증 및 업데이트	프로그램 예측 오차율	오차율 20%(+10%)	(예측값-측정값)/측정값*100 (%)	0.223	
2-2a	공동구(직경3.5m급) 급곡(R30m) 시공을 위한 급곡장치	지하시설물 밀집 지역 및 지하공간 지장물 우회 급곡구간 R30m장비	국외 벤치 마킹 급곡구간 극복 장비 조사, 국내 토질에 맞는 급곡구간 극복 장비 목표 사양 조사	각 3건 이상	조사 건수 확인	4건	이엠코리아(주)
		R30m급곡장비 설계 및 제작진행	핵심부품 상세설계	100% 이내	상세도면	100%	
			시제품 제작 진행	50% 이내	시제 부품	50%	
		R30m 급곡 장비 제작 및 조립	시제품 제작 및 조립	100% 이내	시제품	100%	
			자체평가	자체평가	자체 시험 평가	자체평가 통과	
		실대형실험을 통한 급곡장치 성능평가	급곡장치 성능평가	1건	성능평가 보고서	2건	
		실대형실험의 결과에 의한 장비최적화	장비최적화	1건	최적화 보고서	2건	
2-2b	급곡구간 소형 쉼트TBM 세그먼트 및 굴진 안정을 위한 공법	문헌조사를 통한 쉼트TBM 급곡구간 굴착 핵심기술 정립	문헌조사를 통한 쉼트TBM 급곡구간 굴착 핵심기술 정립	핵심기술 3건이상 정립	조사건수 확인	3건 이상	호서대학교 산학협력단
		모형시물레이션을 통한 상호거동모델 이론 제시	모형시물레이션을 통한 상호거동모델 이론 제시	1건	보고서	1건	
		모형시물레이션을 통한 상호거동모델 이론 검증	모형시물레이션을 통한 상호거동모델 이론 검증	1건	실험보고서 제출여부	1건	
		지층구조패턴별, 급곡구간별추진시스템 개발 및 검증	지층구조패턴별, 급곡구간별추진시스템 개발 및 검증	2건	모형실험 및 보고서	2건	
		시공가이드라인 개발 및 제시	시공가이드라인 개발 및 제시	1건 (50%)	보고서	1건	
		시공가이드라인 적용성 평가	시공가이드라인 적용성 평가	1건 (100%)	시공 가이드라인 보완 및 검증	1건	
2-2c	편심을 고려한 급곡구간용 세그먼트 라이닝 시공기술	급곡구간용 세그먼트라이닝의보 강상세기술	문헌 및 현장조사를 통한 시공중 급곡구간 세그먼트 라이닝 파손사례 조사	3건 이상	조사 건수 확인	3건 이상	(주)콘택이엔지
			급곡구간 세그먼트라이닝의 요구 성능검토	요구성능 정립	요구성능 보고서확인	요구성능 정립	
		급곡구간용 세그먼트라이닝의보 강상세기술	보강기술 정립	개선단면 3개안제시	도면작성및 수치해석	개선단면 3개안제시	
		급곡구간용 세그먼트라이닝의보 강상세기술	급곡구간용 하이브리드 세그먼트 형상검토	90% 이상	휨성능시험, 편심하중시험	90% 이상	
		급곡구간용 세그먼트라이닝의 시공기술	분할수, 폭, 테이퍼량, 연결부 검토	80% 이상	관계분석 보고서	80% 이상	
		세그먼트 시작품 제작을 위한 거꾸집 설계	거꾸집 설계 및 제작	1건	설계도면 및 세그먼트 거꾸집	1건	
		실대형 실험을 통한 성능평가 및 보완	실대형 실험 수행	1건	보고서	1건	
		급곡구간용	세그먼트조립및	1건	전문가 자문	1건	

구분	핵심연구성과	단위성과물	질적성과지표	목표치	측정방법	달성치	해당기관
		세그먼트라이닝의 시공기술	시공매뉴얼(안)				
		세그먼트 경제성 분석	경제성 분석	1건 이상	기존 세그먼트와의 비교를 통한 경제성검토	1건 이상	
2-2d	지수재 최적화를 통한 급곡구간 이음부 방수시스템 및 시공기술	급곡구간 지수재 재질(성능) 선정 가이드라인 및 급곡구간 지수재 시공방안	해외 급곡구간 지수재 사용 및 설치 현황 파악 및 분석	3건 이상	조사 건수 확인	3건 이상	건국대학교 산학협력단
		급곡구간 세그먼트 이음부 지수재 설치방안 시공기술 제안	설치방안 고안	100%	설치방안	100%	
		급곡구간 지수재 선정가이드라인 제안	가이드라인 제시	100%	가이드라인	100%	
		실내실험을 통한 새로운 방수 체계 성능 평가	실내 실험 수행	2건	실내실험	2건	
		지수재 2열 배열 시스템 방수성능 검증	실내 실험 수행	1건	실험결과	1건	
		지수재 2열 배열 시스템 방수성능 검증	실내 실험 수행	1건	실험결과	1건	
		급곡구간 암반여굴 생성을 위한 워터젯 영향인자 도출	영향인자 제시	1건	보고서 제출	1건	
2-2e	워터젯을 이용한 급곡구간 여굴생성 기술	워터젯 영향인자에 따른 암반 여굴량 상관관계 분석	상관관계 제시	1건	보고서 제출	1건	한국지질 자원연구원 (3,4차년도)
		효율적인 암반여굴 생성을 위한 워터젯 최적변수 결정	암반여굴 생성을 위한 최적변수 제시	1건 이상	최적변수	1건	
		급곡구간 암반여굴 생성을 위한 워터젯 시스템 설계안	워터젯 시스템 설계안 제시	1건	설계안	1건	부산대학교 산학협력단 (5,6차년도)
		급곡구간 암반여굴 생성을 위한 워터젯 시스템 설계안 검토 및 보완	워터젯 시스템 설계안 보완	1건 이상	실험을 통한 효과분석	1건	
		특수지반 분류체계	분류체계제안	1건	보고서	1건	서울대학교 산학협력단
2-3a	특수지반 분류 및 쉴드 TBM효율적 통과기법 개발	특수지반 절삭시험	절삭시험조건	30개	보고서	1건	
		특수지반 급속시공 매뉴얼(안)	매뉴얼(안)	1건	보고서	1건	
		특수지반 급속시공 매뉴얼	매뉴얼	1건	보고서	1건	
		특수지반의 보강 문제점 및 대책 제시	분석보고서	1건	보고서	1건	(주)수성엔지니어링
2-3b	특수지반 최적보강 설계기준 및 시방서 제안	보강사례를 통한 특수지반별 통과방안 분석 및 제안	통과방안 제안서	1건	제안서	1건	
		수치해석을 통한 보강공법 영역제안 및 보강적정성 검토	보강방안 및 보강영역 제안서	1건	제안서	1건	
		최적보강을 위한 체계화된 설계매뉴얼 제시	특수지반 최적보강을 위한 설계매뉴얼 제시	1건	보고서	1건	
		국내외 쉴드 TBM 설계/시공자료 분석	분석보고서	1건	보고서	1건	(주)동아지질
2-3c	특수지반 쉴드TBM 최적운용조건 및 장비선정 기법 개발	쉴드 TBM 최적운용 조건(안) 제안	최적운용 조건(안) 제안서	1건	제안서	1건	
		쉴드 TBM 최적 장비 선정(안) 제안	제안서	1건	보고서	1건	
		쉴드 TBM	가이드라인(안)	1건	보고서	1건	

구분	핵심연구성과	단위성과물	질적성과지표	목표치	측정방법	달성치	해당기관
		최적운용 조건 및 장비 선정 가이드라인					
2-3d	특수지반용 고성능 디스크커터 개발	특수지반용 디스크 커터 설계	신소재개발보고 내부설계보고	2건	보고서	2건	(주)진성티이씨
		특수지반용 디스크 커터 설계	신소재커터링제작보고 플로팅셀제작보고	2건	보고서 건수	2건	
		특수지반용 디스크 커터 설계	디스크커터시제품제작 및 축소형디스크커터시 험검증보고서	1건	보고서 건수	1건	
			디스크커터 시제품 제작	1건	시제품 제작 건수	1건	
		특수지반용 디스크 커터 설계	시제품 제작	1건	시제품 제작 건수	1건	
2-4a	소단면 쉘드 TBM 실험시설 구축 및 운영기술	소단면 쉘드 TBM 실험시설 연구 및 기본설계	소단면 쉘드 TBM 실험시설 연구 및 기본설계	1건	설계도면 적절성 검토	1건	한국과학기술원
		소단면 TBM 실험시설 성능검증 토조 및 장비 상세설계	소단면 TBM 실험시설 성능검증 토조 상세설계	1건	설계서	1건	
			소단면 TBM 전단부굴진 시험 장비설계	1건	설계서	1건	
		소단면 TBM 실험시설 성능검증 시설 구축	실험시설 성능검증 토조	1건	보고서	1건	
			굴진 환경 모사 방안	1건	보고서	1건	
		소단면 터널식 공동구 실험시설 성능검증 실험수행 및 보완	구축보고서	1건	보고서	1건	
		소단면 터널식 공동구 실험시설 성능검증 실험수행 및 활용/인증 방안 제시	지침서	1건	지침서	1건	
		소단면 터널식 공동구 실험시설 성능검증 시설 활용안 추진	활용추진안	1건	활용추진안	1건	
3-1a	지반 변위와 지하수 유출을 방지하는 수직구 외주면 굴착 기술 및 장비	공동구용 수직구 급속굴착 시공 기술 및 장비	외주면 선행 굴착장비 설계, 최적설계를 위한 안정성 검토	기초설계 도출 및 지반 안정성 검토	기초설계 및 모형 실험 보고서 확인	100%	한국과학기술원
		장비모형/굴착기준개발	급속 라이닝 외주면 굴착장비 모형	100%	설계도 및 특허	100%	
			실내시험에 의한 굴착공법 안정성 분석 보고서	100%	보고서	100%	
		굴착장비 시제품 제작	급속라이닝 외주면 굴착장비/제어시스템	100%	보고서	100%	
		장비모형 / 굴착기준 개발	급속 라이닝 외주면 굴착장비 모형 및 실내시험	100%	보고서	100%	
			수치해석을 이용한 원심모형시험결과검증 및 사례연구	100%	보고서	100%	
		굴착장비 시제품 제작	급속라이닝 외주면 굴착장비/제어시스템 (일부 제작)	100%	보고서	100%	
		굴착장비 시제품 일부 제작	급속라이닝 외주면 굴착장비/제어시스템 일부 제작, 연구내용	25% 제작, 2건	게재 건수	25% 제작, 2건	

구분	핵심연구성과	단위성과물	질적성과지표	목표치	측정방법	달성치	해당기관
		시제품 실대형 성능검증	논문 게재				
			굴착장비-제어 시스템 연동 기술검증 보고서	1건	보고서 작성 건수	1건	
			외주면 굴착장비 실대형 성능검증 시험	굴착 속도 1 m/day	굴착 속도	굴착 속도 1 m/day	
		테스트 베드	시공성 평가 및 보완점 개선 보고서	1건	보고서 작성 건수	1건	
			급속라이닝외주면 제어시스템 제작 완료(시제품)	1건 (100%)	제작건수	1건 (100%)	
			급속라이닝외주면 굴착기술 기술이전	1건	적용건수	1건	
3-1b	저소음/무진동 암반지반 급속굴착 시공기술 및 장비	저소음/무진동 암반지반 급속굴착 기술 및 장비	저소음/무진동 수직구 내 암반지반 굴착장비 설계 및 최적 굴착조건 도출	기초설계 및 최적 굴착조건 도출	기초설계 및 최적 굴착조건 보고서 확인	100%	(주)에이엔씨
		장비모형 / 굴착기준 개발	실내시험을 통한 최적 굴착 기준 보고서	100%	보고서 및 특허	100%	
		시제품 제작을 위한 설계 보완	실내시험을 통한 할암부 최적굴착 기준 도출	100%	보고서	100%	
		장비모형 / 굴착기준 개발	굴착기 시제품	1건	제작건수	1건	
		시제품 실대형 성능검증	시제품 제작/굴착성능에 대한 실대형 성능검증 시험 (60dB, 무진동)	1건/굴착 속도 1 m/day	굴착 속도	1건/굴착 속도 1 m/day	
		테스트베드	테스트베드 보고서 / 굴착공법 매뉴얼	1건	적용 건수	1건	
3-2a	공동구용 수직구 하향식 라이닝 현타 급속 (1 m/day 이상) 시공기술 및 장비	국내외 수직구 하향식 라이닝 성형장치 동향 조사	국내외 수직구 동향 파악 보고서	100%	보고서	100%	(주)네오시티
		수직구 하향식 급속성형장치 설계 및 부분제작	급속성형장치 도면화, 구조검토를 통한 3D 모델링	100%	도면 및 3D 모형 부분제작	100%	
		수직구 구조물 슬래브/계단/접속 개구부 설계 및 매뉴얼 개발	도면화를 통한 설계 및 구조검토	100%	도면	100%	
		수직구-수평터널 연결부 성형장치 설계 및 부분제작	연결부 성형장치 도면화 및 구조검토	100%	도면	100%	
		수직구 하향식 급속성형장치 시제품 제작	급속성형장치시제품 제작(내경Ø8.0m기준 시공속도1m/day)	80% 제작 1건	제작건수	80% 제작 1건	
		콘크리트 최적배합 개발	콘크리트최적배합 (탈형강도5Mpa기준)	80% (4Mpa) 1건	배합강도	80% (4Mpa) 1건	
		수직구 구조물 슬래브/계단/접속 개구부 설계	수직구 구조물 슬래브/계단/접속 개구부 설계 매뉴얼	1 건	발간건수	1 건	
		수직구-수평터널 연결부 성형장치 부분제작	수직구-수평터널 연결부성형장치부분제작 (Ø3.5m이상)	50%제작 (Ø3.6m) 1건	제작건수	50%제작 (Ø3.6m) 1건	
		수직구 하향식 급속성형장치 성능보완 및 시제품 제작	급속성형장치시제품 제작성능보완(내경Ø8.0m기준시공속도1 m/day)	100% 제작 1건	제작건수	100% 제작 1건	
		수직구 구조물 슬래브/계단/접속 개구부 설계	수직구 구조물 슬래브/계단/접속 개구부 설계 매뉴얼	1 건	발간건수	1 건	
		수직구 PC 중공형 현타 성형장치 제작	수직구 PC 중공형 현타 성형장치 제작 (내경 8.0m 기준)	100%제작 (내경Ø8.0m)	제작건수	100%제작 (내경Ø8.0m)	

구분	핵심연구성과	단위성과물	질적성과지표	목표치	측정방법	달성치	해당기관
		수직구-수평터널 연결부 성형장치 부분제작	수직구-수평터널연 결부성형장치부분제 작Ø3.5m이상	1건 100%제 작 (Ø3.6m) 1건	제작건수	1건 100%제 작 (Ø3.6m) 1건	
		수직구 하향식 급속성형장치 및 PC구조물 테스트베드 현장시험 성능평가	성능시험 및 테스트베드 현장시험	1 건	현장시험	1건	
3-3a	공동구용 수직구 접속부 보강/차수 장치 개발	수직구 접속부 보강/차수장치	요소기술 조사 및 분석, 직경별/시공 심도별 상대변위 분석	구조물 상대변위 영향인자 도출, 수용범위 검토	조사 건수 확인	구조물 상대변위 영향인자 도출, 수용범위 검토	(주)세니즈코퍼 레이션
		차수장치 설계, 목업 제작 및 시제품 구성	직경별/시공심도별 상대변위 분석 보고서	100%	보고서	100%	
			터널-수직구 접속부 차수장치 설계도	100%	설계도, 보고서	100%	
			차수장치 목업 제작	100%	목업, 보고서	100%	
			차수장치 시제품 구성	100%	보고서	100%	
		차수장치 시제품 제작을 위한 설계보완	차수장치 시제품 구조검토	100%	보고서	100%	
			차수장치 시제품 최종 설계도면 작성	100%	설계도, 보고서	100%	
		차수장치 시제품 제작	실증시험 및 테스트베드용 시제품 제작 (심도 20m 차수 100%)	1 건	제작 건수	1 건	
		시제품 실험형 성능검증	상대변위 흡수율 및 차수율 검토 보고서	1 건	보고서 작성 건수	1 건	
			접속부 차수장치 매뉴얼	1 건	보고서 작성 건수	1 건	
3-3a	지하수 유출저감형 도심지 공동구용 수직구 차수공법	비시멘트 바이오폴리머 기반 재료 개발	바이오 폴리머 재료 물성 및 유동학적 특성 개선	100%	실내투수 시험 (ASTM 표준규격)	100%	UNSW
		수직구 보강/차수를 위한 비시멘트 바이오폴리머 차수재 성능 검증	바이오폴리머 기반 차수재	10-5 m/day 이상 저감	실내투수 시험	10-5 m/day 이상 저감	
		수직구 보강/차수를 위한 비시멘트 바이오폴리머 차수재 성능 검증	바이오폴리머 기반 차수재	10-5 m/day 이상 저감	실증조건 투수시험	10-5 m/day 이상 저감	
		수직구 보강/차수를 위한 비시멘트 바이오폴리머 차수재 제품화	바이오폴리머 기반 차수재 제품화 (20kg 분말)	1 건	출시 건수	1 건	

나. 양적성과 달성도

(1) 연구단 총괄 양적성과 달성도

구분			1차년도		2차년도		3차년도		4차년도		5차년도		6차년도		총괄	
			목표	달성치	목표	달성치	목표	달성치	목표	달성치	목표	달성치	목표	달성치	목표	달성치
연구단 총괄	국외 논문 게재	SCI			0	1	3	4	3	1	2	9	1	1	9	16 (초과달성)
		비SCI														
		계			0	1	3	4	3	1	2	9	1	1	9	16 (초과달성)
	국내 논문 게재	SCI														
		비SCI	1	2	9	6	11	14	20	18	13	14	6	7	60	61 (초과달성)
		계	1	2	9	6	11	14	20	18	13	14	6	7	60	61 (초과달성)
	특허 출원	국내	1	3	12	15	8	12	4	6	2	6			27	42 (초과달성)
		국외														
		계	1	3	12	15	8	12	4	6	2	6			27	42 (초과달성)
	특허 등록	국내					1	4	4	7	2	9	1	8	8	28 (초과달성)
		국외														
		계					1	4	4	7	2	9	1	8	8	28 (초과달성)
	인력 양성	석사	0	1	3	3	1	3	0	1	0	4	0	1	4	13 (초과달성)
		박사	0	1			0	1			0	1			0	3 (초과달성)
		계	0	2	3	3	1	4	0	1	0	5	0	1	4	16 (초과달성)
	기술 이전	계약 건수							0	2	1	2	0	7	1	11 (초과달성)
		계약액								100만원		100만원		4300만원		4500만원 (매출액% 계약제외)
		징수액														
	국제 표준화	기고서 제출														
		기고서 채택														
		표준안 채택														
	국내 표준화	기고서 제출									1	0	0	0	1	0 (미달성)
		기고서 채택														
		표준안 채택														
	등록· 기탁 대상성 과물	보고서 원문	2	7	3	3	4	7	5	7	5	7	1	1	20	32 (초과달성)
		연구시설·장비							1	2					1	2 (초과달성)
		기술요약정보	0	1					1	1	4	4	2	2	7	8 (초과달성)
		소프트웨어			1	1	1	1	2	2	1	4	3	4	8	12 (초과달성)
		화학물														
	신기술	시제품	0	1	1	1	1	2	5	4	1	2	3	3	11	13 (초과달성)
		성과 홍보	0	1	2	5	0	4	0	2	1	1			3	13 (초과달성)
		설계도면														
		시험시공/현장적용									1	2	1	4	2	6 (달성)
		일자리 창출	1	1	1	1							0	1	2	3 (초과달성)
		학술발표	0	10	2	14	4	10	4	23	5	25	1	0	16	82 (초과달성)
		장치개발														
		정책제안									0	2	0	1	0	3 (초과달성)
		매뉴얼									2	3	4	15	6	18 (초과달성)
		신기술														

(2) 1세부 연차별 양적성과 달성도

구분			1차년도		2차년도		3차년도		4차년도		5차년도		6차년도		총괄	
			목표	달성치	목표	달성치	목표	달성치	목표	달성치	목표	달성치	목표	달성치	목표	달성치
1세부	국외 논문 게재	SCI														
		비SCI														
		계														
	국내 논문 게재	SCI														
		비SCI			4	3	6	8	11	10	5	6	4	5	30	32 (초과달성)
		계			4	3	6	8	11	10	5	6	4	5	30	32 (초과달성)
	특허 출원	국내					0	1							0	1 (초과달성)
		국외														
		계					0	1							0	1 (초과달성)
	특허 등록	국내							0	1					0	1 (초과달성)
		국외														
		계							0	1					0	1 (초과달성)
	인력 양성	석사									0	1	0	1	0	2 (초과달성)
		박사														
		계									0	1	0	1	0	2 (초과달성)
	기술 이전	계약 건수											0	3	0	3 (초과달성)
		계약액												1600만원		1600만원
		징수액												1600만원		1600만원
	국제 표준화	기고서 제출														
		기고서 채택														
		표준안 채택														
	국내 표준화	기고서 제출									1	0			1	0
		기고서 채택														
		표준안 채택														
	등록· 기탁 대상성 과물	보고서 원문	2	2	2	2	3	3	1	1					8	8 (달성)
		연구시설·장비														
		기술요약정보	0	1					1	1	4	4	2	2	7	8 (초과달성)
		소프트웨어			1	1	1	1	1	1			3	3	6	6 (달성)
		화학물														
	신기술	시제품														
		성과 홍보														
		설계도면														
		시험시공/현장적용									0	1			0	1 (초과달성)
		일자리 창출	1	1	1	1									2	2 (달성)
		학술발표	0	1	0	1	0	1	0	3	0	8			0	14 (초과달성)
		장치개발														
		정책제안									0	2	0	1	0	3 (초과달성)
		매뉴얼									0	1	1	5	1	6 (초과달성)
		신기술														

(3) 2세부 연차별 양적성과 달성도

구분			1차년도		2차년도		3차년도		4차년도		5차년도		6차년도		총괄	
			목표	달성치	목표	달성치	목표	달성치	목표	달성치	목표	달성치	목표	달성치	목표	달성치
2세부	국외 논문 게재	SCI			0	1	2	3	2	0	1	7			5	11 (초과달성)
		비SCI														
		계			0	1	2	3	2	0	1	7			5	11 (초과달성)
	국내 논문 게재	SCI														
		비SCI	0	1	5	3	4	5	7	6	7	7	2	2	25	24
		계	0	1	5	3	4	5	7	6	7	7	2	2	25	24
	특허 출원	국내			6	7	3	5	2	2	0	3			11	17 (초과달성)
		국외														
		계			6	7	3	5	2	2	0	3			11	17 (초과달성)
	특허 등록	국내					1	2	2	3	1	3	1	3	5	11 (초과달성)
		국외														
		계					1	2	2	3	1	3	1	3	5	11 (초과달성)
	인력 양성	석사	0	1	2	2	1	2			0	2			3	7 (초과달성)
		박사					0	1			0	1			0	2 (초과달성)
		계	0	1	2	2	1	3			0	3			3	9 (초과달성)
	기술 이전	계약 건수							0	2	1	2	0	2	1	6 (초과달성)
		계약액								100만원		100만원		(매출액% 계약)		200만원 (매출액% 계약제외)
		징수액														
	국제 표준화	기고서 제출														
		기고서 채택														
		표준안 채택														
	국내 표준화	기고서 제출														
		기고서 채택														
		표준안 채택														
	등록· 기탁 대상성 과물	보고서 원문	0	4	1	1	1	4	4	6	3	5	1	1	10	21 (초과달성)
		연구시설·장비							1	2					1	2 (초과달성)
		기술요약정보														
		소프트웨어							1	1	1	3		1	2	5 (초과달성)
	신기술	화학물														
		시제품			1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	6	6 (달성)
		성과 홍보					0	3	0	2	1	1			1	6 (초과달성)
		설계도면														
		시험시공/현장적용									1	1	1	4	2	5 (달성)
		일자리 창출														
		학술발표	0	6	2	4	2	5	1	10	3	13			8	38 (초과달성)
		장치개발														
		정책제안														
		매뉴얼											0	7	0	7 (초과달성)
		신기술														

(4) 3세부 연차별 양적성과 달성도

구분			1차년도		2차년도		3차년도		4차년도		5차년도		6차년도		총괄	
			목표	달성치	목표	달성치	목표	달성치	목표	달성치	목표	달성치	목표	달성치	목표	달성치
3세부	국외 논문 게재	SCI					1	1	1	1	1	2	1	1	4	5 (초과달성)
		비SCI														
		계					1	1	1	1	1	2	1	1	4	5 (초과달성)
	국내 논문 게재	SCI														
		비SCI	1	1			1	1	2	2	1	1			5	5 (달성)
		계	1	1			1	1	2	2	1	1			5	5 (달성)
	특허 출원	국내	1	3	6	8	5	6	2	4	2	3			16	24 (초과달성)
		국외														
		계	1	3	6	8	5	6	2	4	2	3			16	24 (초과달성)
	특허 등록	국내						2	2	3	1	6	0	5	3	16 (초과달성)
		국외														
		계						2	2	3	1	6	0	5	3	16 (초과달성)
	인력 양성	석사			1	1	0	1	0	1	0	1			1	4 (초과달성)
		박사	0	1												1 (초과달성)
		계	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1			1	5 (초과달성)
	기술 이전	계약 건수											0	2	0	2 (초과달성)
		계약액											2700만원			2700만원
		징수액														
	국제 표준화	기고서 제출														
		기고서 채택														
		표준안 채택														
	국내 표준화	기고서 제출														
		기고서 채택														
		표준안 채택														
	등록· 기탁 대상성 과물	보고서 원문	0	1							2	2			2	3 (초과달성)
		연구시설·장비														
		기술요약정보														
		소프트웨어									0	1			0	1 (초과달성)
	신기술	화학물														
		시제품	0	1			0	1	4	3	0	1	1	1	5	7 (초과달성)
		성과 홍보	0	1	2	5	0	1							2	7 (초과달성)
		설계도면														
		시험시공/현장적용														
		일자리 창출											0	1		1 (초과달성)
		학술발표	0	3	0	9	2	4	3	10	2	4	1	0	8	30 (초과달성)
		장치개발														
		정책제안														
		매뉴얼									2	2	3	3	5	5 (달성)
		신기술														

2. 관련 분야 기여도

가. 파급효과

본 연구는 도심지 공동구 설계법의 기본 개념에서부터 실제 소단면 공동구 굴착을 위한 요소기술의 성능 검증에 이르는 패키지형 연구 개발 프로젝트로서, 소단면 터널식 공동구 분야의 전체적인 기술 수준을 보다 높은 차원으로 도약시킬 수 있을 것이다. 본 연구를 통해 소단면 터널식 공동구의 핵심 선진 기술을 국내 자립화하여 다음과 같은 파급효과가 있을 것으로 예상된다.

- 공동구의 설치의무규모(200만㎡), 설치지역, 기본계획 등과 관련된 법 개정(제정)시 관련 연구에 대한 수요 증대
- 세계적 수준의 설계법 확보로 기술 수출력 확보 및 최적 설계를 통한 공사비 절감
- 공동구 건설공사 안전관리 및 대형재해 대응 기술을 통해 공동구 및 유사 프로젝트 건설공사의 재해율 저감에 기여할 것이며, 설계안전성검토 등 건설안전 관련 제도 정착에 기여
- 암반조건 및 장비 운전조건에 따른 쉴드TBM 굴진을 및 설계모델 개발을 통한 공기 예측 및 장비설계 기술 확보
- 중절(급곡)장치(R30m)기술의 자립화를 통한 해외의존도 저감
- 소단면(Φ3.5m) 급곡 구간(R30m이하)장비 개발을 통하여 대단면(Φ6m~8m급)급곡 구간(R30m이하)장비 개발에 활용
- 고강도 고인성 세그먼트 개발로 내구수명 증가에 따른 유지관리 비용 절감
- 특수지반에서 효과적으로 대응 가능한 급속시공 매뉴얼의 개발로 특수지반에서의 시공 기술 향상 및 시공시 downtime 40% 이하로 유지해 굴진속도 저하 등의 트리블로 인한 경제적 손실 최소화
- 특수지반 특성을 고려한 커터링 신소재 개발 및 핵심요소 기술개발(오링 개발/베어링 회전토크 최적화)
- TBM 기술발전 및 터널 시공품질 향상과 TBM 전문가 인력 양성 추진
- 도심지 시공성이 향상된 민원저감형 공동구 설계·시공기술로 교통 장애 축소, 공급의 안전성 향상 기대
- 접속부 보강/차수 장치 설치 시 접속부 누수 유지보수비 절감 가능
- 도심지 고수압 조건의 지반 굴착시 바이오폴리머 차수재의 급속 고결 및 성능 발현을 통해 차수재 시공성 저하와 그로 인한공기 지연 및 민원 문제 해결 기대
- 시멘트계 차수재 사용 시 발생하는 환경적 우려(중금속 용출, 이산화탄소 배출) 저감

통계청, 한국전력, LH공사 등의 자료를 통해 예측한 공동구 시장 규모는 2024~2033년 사이 총 14,603억원으로 추정되고 있으며, 국외 공동구 누적시장 규모는 ITA의 '14년도 Tunnel Market Analysis의 통계치를 참고하여 2024~2033년 사이 239조원의 막대한 규모로 추정되고 있다. 외부기관을 통한 경제성 평가를 통해 본 연구개발사업의 성과로 인한 국내외 공동구 건설수주 및 장비 매출 등의 직접적인 매출편익이 398억원, 민원저감, 교통체증 감소, 건설재해 저감효과 등의 직접적인 비용절감 편익이 61.7억원으로 평가된다. 또한 본 연구의 성공으로 인한 생산유발효과가 1,458억원, 부가가치 유발효과가 460억원, 고용 및 취업유발효과가 1,398명으로 전체적인 경제적 효과는 향후 10년간 2,361억원으로 추정된다.

본 연구의 개발을 통해 나타날 것으로 예상되는 기술적, 경제적·산업적 파급 효과는 아래의 표와 같이 요약할 수 있다.

<표 4.2.1> 기술적 파급효과의 요약

세부	개발전	개발후
1세부	TRL 1~2	TRL 7~8
	- 지반분야 설계법 글로벌 기준 미달 - 공동구 표준 공정/공사비 관리 시스템 미비 - 공동구 운영관리 제도 미비 - 공동구 안전관리 시스템 미약	- 국제표준화기구(ISO)에서 요구하는 글로벌 기준 제시 - 정확한 공사비/공기 산정 기준 확립 - 공동구 운영관리 지침 제정 - 건설단계에 따른 선제적 안전관리체계 구축
2세부	TRL 2	TRL 7~8
	- 설계 굴진을 대비 실제 굴진을 오차 39% ($\pm 10\%$). - 급곡구간 R=90~120m로 주로 시공중 - 특수지반 공사시 downtime 80% 발생 - 지하구조물 설계/시공기술 현장적용 어려움	- 설계굴진을 대비 실제 굴진을 오차를 20% ($\pm 10\%$) 감소 - 급곡구간 R30m 급 시공장비 및 부대 설비 개발 - downtime을 10일 중 8일에서 4일 (downtime 40%)로 축소하여 공기 축소 - 성능검증시설을 통하여 사전에 관련 기술 검증을 통해 현장에 적용 가능
3세부	TRL 2~3	TRL 7~8
	- 0.3m/day의 낮은 수직구 굴착속도 - 할암굴착 공중복잡/시공성 저하 - 0.3m/day의 낮은 구조물 시공속도 - 가시설 공중복잡/시공성 저하 - 수직구 접속부 차수/보강장치 부재 - 바이오 폴리머 차수재 세계적으로 부재	- 1m/day의 높은 수직구 굴착속도(공기 절감 25% 이상) - 암반굴착 공중 단순화/시공성 향상 - 1m/day의 높은 구조물 시공속도(공기 절감 25% 이상) - 가시설 배제로 공중 단순화/시공성 향상 - 심도 20m이상, 세계수준 달성 - 친환경 바이오 차수재 세계수준 달성

<표 4.2.2> 경제적 파급효과의 요약

세부	개발전	개발후
1세부	- 지반분야 설계법 글로벌 기준 미달로 지반의 불확실성이 고려되지 않음 - 공동구 표준 공정/공사비 관리시스템 미비 - 매년 건설안전 재해 증가에 따른 경제적 손실 비용 증가	- 공동구 공사비 10% 절감에 기여 - LCC 고려로 합리적 사업비 산정 - 공동구 건설 중 발생할 수 있는 안전사고를 선제적으로 차단함으로써, 경제적 손실을 미연에 방지
2세부	- 굴진을 추정의 큰 오차로 인한 공기 증가 - 급곡구간 시공기술의 미흡으로 급곡구간 극복에 추가 비용 소모 - 특수지반에서 downtime 80%로 공기 증가 - 건설신기술의 현장 적용 및 검증이 어려워 기술적 도약으로부터 경제적 이익을 창출하는 것이 지연 - 부적합한 디스크커터의 적용으로 굴착불능 사례 있음 - 특수지반에서 부적합한 대응으로 인해 공기증가 발생, 민원 및 교통혼잡비용 증가	- 설계굴진을 대비 실제 굴진을 오차를 20% ($\pm 10\%$) 감소시켜 연간 6.6억 원 편익 발생((주)날리지웍스, 2020) - 급곡구간 R30m 급 시공장비 및 부대 설비(추진기술, 세그먼트, 방수시스템) 개발 - 특수지반에서 downtime를 10일 중 4일 (downtime 40%)로 축소하여 건당 1.6억원의 경제적 이득 발생 - 건설신기술을 현장조건에서 검증하여 보완 및 실용화를 앞당기고 창조경제에 기여 - 급속시공 매뉴얼의 적용으로 특수지반에서의 보강비용 및 공기 최소화 - 특수지반에서 부적합한 대응으로 인해 발생하는 민원 및 교통혼잡비용 저감
3세부	- 수직구 굴착 공중복잡 경제성 저하 - 도심지 시공시 저효율 할암공법 적용으로 공사비 증가 - 건설기계분야 국내업체 국내시장 점유율 10% 수준 - 수직구 굴착 공중복잡 경제성 저하 - 건설기계분야 국내업체 국내시장 점유율 10% 수준 - 수직구-터널 보강/차수장치 미적용 - 시멘트계/약액 등 차수재 사용	- 수직구 공사비 절감 10% 이상 기여 - 암반굴착 시장 5% 확보시 최대 연간 800억원 매출 기대 - 건설기계분야 국내시장 매출 연간 220억원 증가 기여 - 공사비 절감 10% 이상(5년간 총 61억원 절감) - 건설기계분야 국내시장 매출 연간 220억원 증가 기여 - 차수장치 및 차수재 국내시장 1% 점유시 연간 90억원 매출 기대

(1) 기술적 측면

(가) 도심지 터널식 공동구 최적 설계용량산정 및 글로벌 표준화 설계기술 개발

① 제1-1요소기술 : 도심지 공동구 수용시설별(3종이상) 설계용량 및 단면 최적화 기술 개발

- ㉠ 기존 도심에 공동구 건설시 막대한 예산이 소요되므로, 도심지 공동구 활성화를 위한 비용 부담 및 국가 지원 등에 대한 실질적인 규정이 요구되는 실정이며, 사업시행자와 점용기관이 부담하는 방식에 대한 사업 추진 절차가 필요함.
- ㉡ 터널식 공동구에 수용시설(전력, 통신, 상수도 등)별 상호 영향인자(온도, 원활한 기능 발휘, 유지관리원의 효율성 등)를 고려하여 수용시설별 최적화된 단면 기술력 확보가 필요하며, 국내의 모든 신도시 공동구는 공동구로 수용이 가능한 생활공급(Life-Line)시설의 대부분을 수용하도록 계획하고 있으나 기존 도심지는 오랜 기간 각종 공급시설이 무분별하게 개별 매설되었으므로 매설물의 정비를 통한 지하공간 이용효율의 증대가 필요함. 이를 위해서는 도심지 유형별 평가시스템을 세분화하고 지표별 정량적 평가방법을 설정해서 지표항목에 대한 사회적 요구와 경제적 타당성의 종합평가로서 공동구로 수용하는 것이 효율적인 수용시설의 종류와 규모 등을 설정하는 등 설계용량의 최적화를 연구해야 할 필요가 있음.
- ㉢ 소단면 터널식 공동구의 경제성 평가를 위한 비용분석 모델은 기존의 건설 구조물(교량, 터널 등)의 비용평가와는 다르게 공동구 구조물 특성에 맞는 비용분석 모델이 개발되어야 함. 비용분석 모델은 공동구 경제성 평가 및 공동구 구조물, 수용시설물의 생애주기 차원이 비용 항목을 고려하여 최적설계를 위한 의사결정에 기여할 수 있음. 또한 표준 공정 및 내역 산출 프로그램 개발 연구를 기반으로 현장별 특성을 반영한 도심지 소단면 터널식 공동구 시공에 적합한 공사/공정관리 시스템을 개발하고자 함. 개발된 공동구 공사/공정관리 시스템을 통하여 공동구 관련 시공 및 설계 기술개발의 시공관리 차원의 최적 공사비/공기 산출 의사결정에 기여하고자 함.

② 제1-2요소기술 : 터널식 공동구의 글로벌 표준화 설계법(LRFD) 개발

- ㉠ 건설시장의 개방화에 따른 설계기준의 국제 표준화 필요함에 따라 국제표준화기구(ISO)에서 요구하는 신뢰도기반이며 한계상태설계법이어야 한다는 규정을 만족할 필요가 있음. 국내의 경우 일부구조물(교량, 항만, 철도 등)의 설계기준에만 한계상태설계를 실시하고 터널식 공동구에 대해서는 적용하지 않음. 따라서 본 연구에서 개발된 터널식 공동구 한계상태설계기준(안)을 통해 해외 설계 프로젝트 수주에 있어 경쟁력을 확보할 수 있고, 관련 산업의 경쟁력 강화가 가능함.
- ㉡ 기존의 한계상태설계법이 강도설계법은 다소 과도한 안전율이 적용되는 경향이 있으나, 한계상태설계법은 불확실성에 대한 신뢰성 분석을 기반으로 최적화 설계가 가능한 설계법으로서, 터널식 공동구에 한계상태설계법 적용으로 터널식 지중구조물에

대한 최적설계개념과 설계법을 제시하여 국내 설계에 전파하고자 함.

- ㉔ 세계적 추세인 성능중심의 터널식 공동구 설계·시공이 가능하고 보다 경제적인 한계상태설계법(LSD, Limited State Design) 확보 및 기준 반영 이 필요함. 공동구와 같은 지반구조물 설계 시 선진국에서는 한계상태설계법이나 생애주기비용분석 등의 적용으로 최적화 설계하는 것이 추세이므로 설계기술의 글로벌 표준화를 통해 엔지니어링 산업 및 건설분야의 해외진출 확대에 기여하고자 함.

③ 제1-3요소기술 : 도심지 소단면 터널식 공동구 건설단계 (계획·설계·시공)별 안전 위험요인을 고려한 안전관리기술 개발

- ㉔ 취약성이 높은 국내 도심지 소단면 터널식 공동구의 건설단계(계획, 설계 및 시공)별 안전관리기술 마련하기 위한 위험성평가 기법 및 안전관리기준을 확보함으로써, 소단면 공동구의 안전한 시공이 기대됨. 또한 본 연구에서 개발한 최종성과물이 연구 종료 이후에 선순환적으로 작용하여 재해코스트를 절감하는 경제적 효과로 까지 연결될 것으로 예상됨
- ㉔ 건설 중 위험성평가 기법 및 안전관리기준을 고려한 설계안전성검토는 우리나라뿐만 아니라 국내건설업체의 해외 공사 및 세계적으로 빈번하게 시행되어지고 있는 하나의 건설 트렌드로써, 합리적인 안전관리와 방재기법 개발 및 체계화는 국내 건설업체가 국제적인 경쟁력을 갖추게 하고 국외 건설안전시장에서의 코디네이터 또는 컨설팅 등 다양한 역할을 수행할 수 있게 될 것으로 기대됨.
- ㉔ 침수, 화재연기 등의 확산 지연에 대한 대응기법을 개발하여 터널 내 재난발생 시 대피자들의 피난로 및 시야 확보로 신속한 대피 및 확산에 따른 질식사를 최소화하게 하고, 공동구 내부 구조 및 기타시설물 피해를 저감시켜 경제적 손실의 최소화가능할 것으로 기대가 됨.

(나) 도심지 소단면 터널식 공동구 굴진을 예측기법과 급곡구간/특수지반 급속 시공기술 개발

① 제2-1요소기술 : 쉘드TBM 현장굴진자료 DATA분석을 통한 굴진성능 예측 및 산정기법 제시

- ㉔ 소단면 쉘드TBM을 통해 시공한 15곳 현장의 지속적인 굴진DB 구축을 통해 빅데이터 기반의 지반특성과 기계데이터간 다양한 상관관계 도출이 가능함. 또한, 개발한 굴진DB 관리 시스템을 활용하여 효율적으로 굴진데이터를 구축하고, 영향인자 상호간 자동화 분석이 가능함.
- ㉔ 시추조사에 대한 지반조사의 한계점을 극복하고자 본 연구에서는 전기비저항 탐사기법을 활용하여 전기비저항 결과값과 다양한 암반특성과의 상관관계를 도출함. 이를 활용하여 시추공 간 다양한 지반특성을 확보함으로써 보다 정확한 굴진을 산정기법 도출이 가능하며, 다양한 지반공학 분야에서 활용가능 할 것으로 기대함.
- ㉔ 통계분석을 통하여 도출한 순굴진을 산정방법은 초기 굴진데이터를 기반으로 잔여구

간에 대해 예측성 높은 굴진율 산정에 기여할 것으로 기대함.

- ㉠ 순굴진율 산정기법은 국내 최초로 3.5m급 쉘드TBM 실험을 바탕으로 개발되었기 때문에 실제 굴착메커니즘을 반영한 연구결과물임. 다양한 암반조건과 장비의 운전특성을 고려하여 소단면 공동구 건설 시 순굴진율을 예측하거나 장비의 기본 설계사양을 결정할 때 유용하게 활용될 것으로 기대함. 또한, 장비의 구동부의 토크와 회전속도의 상관관계를 통하여 장비의 최적운전 조건 등을 제시할 수 있음.
- ㉡ 쉘드TBM 굴진율 산정 프로그램은 과거의 자료와 실시간으로 업데이트 되는 데이터를 기반으로하여 머신러닝 기술을 접목한 최초의 연구이며, 새로운 굴진율 예측 방식을 적용하여 굴진율 예측성능을 높인 기술임. 예측 프로그램을 통하여 터널식 공동구의 합리적이고 명확한 굴진관리에 기여할 것으로 보임.

② 제2-2요소기술 : 소단면 터널식 공동구 급곡구간(R30m 급) 쉘드 TBM 추진기술 및 중절장치 개발

- ㉢ 국내 쉘드 장비에 대한 기술 개발은 전무하고 커터헤드 제작기술개발 및 운전제어 기술개발은 완료 및 진행 중이며, 쉘드 장비의 급곡 장치에 대한 기술 개발은 본 연구단에서 수행하는 급곡(R30m) 장비 개발을 통하여 비록 소구경 쉘드 TBM이지만 국산화 성공으로 향후 쉘드TBM 기술 개발에 큰 영향을 줄 것으로 판단함.
- ㉣ 소단면 터널식 공동구 급곡구간의 추진으로 인한 세그먼트 라이닝의 파손원인을 분석하고 요구성능을 만족하는 형태의 개선이나 보강을 통해 누수방지, 철근의 부식방지 등으로 내구수명 확보 가능함.
- ㉤ R=30m이하의 급곡구간용 세그먼트 라이닝의 제작 및 시공기술 개발로 도심지 지장물로 인한 급곡구간의 선형계획과 설계의 제한조건을 완화시키는데 기여할 것으로 예상됨.
- ㉥ 공동구 터널의 필수 조건인 세그먼트 이음부 방수기술 해결을 통한 터널 안정성 확보함.

③ 제2-3요소기술 : 소단면 터널식 공동구 특수지반/특수조건 쉘드TBM 급속(downtime 40% 이하) 시공기술 개발

- ㉦ 도심지 공동구 건설 시 특수지반을 효율적으로 대처하기 위한 특수지반 급속시공매뉴얼의 개발로 특수지반에서의 시공기술 향상에 기여함.
- ㉧ 도심지 공동구 건설 시 TBM 기내에서 보강 및 선진 프로브 탐사가 가능한 장비의 개발 및 활용기술 확보함.
- ㉨ 특수지반에 적합한 고성능 디스크 커터 재료, 내부구조 설계 및 제작 기술 개발
- ㉩ 특수지반 쉘드TBM현장의 지질적, 기계적 Downtime 발생요소를 분석하고 이에 대한 운용조건 및 장비선정에 대한 기술적 제안 및 TBM용 그라우팅 프로브드릴 개발로 현장작업의 Downtime을 최소화 할 수 있을 것으로 기대함.
- ㉪ 신소재로 제작된 디스크커터의 내마모성은 기존커터 대비 20% 이상의 향상으로 커터의 교체 주기를 감소시켜 downtime 감소에 기여함.

- ④ 제2-4요소기술 : 소단면 터널식 공동구 시공기술에 의한 소단면 터널식 공동구 성능 검증 시설 개발
- ㉠ 구축된 시설의 지상굴진시험 장비를 이용하여 신타형 TBM 그대로 모사된 지반을 굴착하면서 각각의 부분끼리의 상호 호환과 영향성을 파악가능하며 허용추력 8000 kN까지 굴진 시험이 가능함.
- ㉡ 구축된 시설의 지하토조는 깊이 10m로 지반매질의 자중에 추가로 2bar의 하중을 가할 수 있으며 13m의 굴진으로 실제 세그먼트를 설치해가면서 실제 현장에서의 굴진을 그대로 구현가능 함.

(다) 공동구용 수직구 급속시공을 위한 저소음/무진동 시공시스템, 보강/차수 기술 개발

- ① 제3-1요소기술 : 공동구용 수직구 저소음/무진동 급속굴착(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발
 - ㉠ 독점적인 선진 외국의 수직구 굴착 장비 기술에 대한 독자적인 경쟁력 확보
 - ㉡ 장비 제작 관련 요소기술 발전으로 건설기계 제작기술 활성화
 - ㉢ 전력구, 지하철, 자원개발, 지하 저장시설 등과 같은 유사 지하시설 구축 시공 시, 기술 파급효과 발생
 - ㉣ 1m/day의 높은 수직구 굴착속도(공기 절감 25% 이상)
 - ㉤ 가시설 배제로 공중 단순화/시공성 향상
 - ㉥ 암반굴착 공중 단순화/시공성 향상
- ② 제 3-2요소기술 : 공동구용 수직구 하향식 라이닝 현타 급속(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발
 - ㉠ 국내 도심지 및 신도시 개발지역 공법 개발 시 적용성 증가
 - ㉡ 국내 최초 공동구 하향식 수직구 설계 및 시공기술 확보
 - ㉢ 외국 진출 시장 : 시공 기술력 확보
- ③ 제 3-3요소기술 : 공동구용 수직구 접속부 보강/차수장치(심도 20m 이상) 및 바이오폴리머 차수공법 개발
 - ㉠ 선진국 수준의 수직구 시공기술 개발로 국내 설계·시공 기술 향상.
 - ㉡ 해외 사례가 적은 접속부 보강기술 기술 개발에 따른 기술경쟁력 증대 및 시공기술 선도

(2) 사회·경제적 측면

(가) 도심지 터널식 공동구 최적 설계용량산정 및 글로벌 표준화 설계기술 개발

① 제1-1요소기술 : 도심지 공동구 수용시설별(3종이상) 설계용량 및 단면 최적화 기술 개발

- ㉮ 국내 공동구는 모두 신도시 개발사업에 포함되어 건설되었기 때문에 개착 BOX 형태를 이루고 있으나 기존 시가지를 대상으로 독자적 공동구를 건설 중인 국외의 경우 터널식 공동구 형태를 주로 채택하고 있음.
- ㉯ 기존 시가지 대상 공동구는 신도시 공동구와 달리 복공·가시설 설치로 인한 건설비용의 증가, 장기공사 민원, 주변 건물 침하 우려 등으로 인해 공사여건이 크게 불리하며 공동구의 사회적 요구가 큰 중심가 도심지는 교통량이 많아 장기적으로 차로를 차단하거나 우회 차로 설치가 곤란한 것이 일반적이므로 터널식 공동구 설치가 합리적임.
- ㉺ 도심재생지역의 경우 터널식 공동구를 설치하여 각종 지중매설물을 효율적으로 관리함으로써 경제성을 확보하고 난개발에 따른 민원요인 제거에 기여하고자 함.
- ㉻ 신도시 공동구에는 도시민 생활수준의 향상을 반영한 공급시설(쓰레기수송관, 냉·난방관, 중수관, 각종 통신케이블 등)이 수용되므로 대규모 다실 공간구조로 설치되고 있으나 기존 도심을 대상으로 하는 경우에는 전력(주로 배전), 상수도, 통신관로가 주로 수용될 가능성이 높아 소단면 계획이 합리적임.
- ㉼ 도심지에서는 장기간의 건설공사로 인한 차량 통행속도 저하, 도로변 상권 및 보행자 민원 등으로 인해서 기존의 개착식 공동구 보다는 터널식 공동구가 유리하며, 개발사업에 포함되지 않고 공동구를 설치할 경우에 도로를 관리하고 있는 중앙정부와 지방자치단체의 투자비용이 크기 때문에 수용시설의 종류와 규모 등 공동구 설계용량의 최적화가 필요하며 개별 지표항목의 평가방법은 정량적이고 객관적이어야 함.
- ㉽ 관로에 비해 초기 비용이 많이 투입되는 공동구의 설치 계획은 기본적으로 경제성 검토가 수반되어야 하며, 경제성 검토를 위해서는 정성적인 평가 항목을 합리적 수준에서 정량화하여 공동구 설치가 사용주체 및 관리주체 측면에서 발생하는 비용 효과가 정확하게 분석되어야 함.
- ㉾ 공동구가 주로 시공되는 도심지의 경우, 설계 및 시공 기술 구현을 위한 공사/공정관리가 수반되어야 공사 중 민원 저감, 최적 공기 도출, 시공 품질관리, 공사중 안전계획 등과 같은 시공 관리 기술이 적용되어 안전하고 최적화된 공동구 설치 공사가 이루어져야 함.
- ㉿ 국내 소단면 터널식 공동구 건설 기술 수준은 현재 추진 중인 민원저감형 경제적 도심지 소단면 터널식 공동구 프로젝트를 추진하기에는 미흡하여, 해외기술 수입을 고려해야하며, 공동구는 공공재로써의 성격이 강하기 때문에 민간에서는 연구개발에 대한 매력이 떨어져 정부에서 주도적으로 연구개발을 추진해야 할 것으로 판단됨.

② 제1-2요소기술 : 터널식 공동구의 글로벌 표준화 설계법(LRFD) 개발

- ㉠ 세계적 수준의 공동구 설계기술 확보로 개발도상국을 중심으로 기술의 수출이 가능할 것으로 기대되며, 공동구 설계기술 자립화로 관련 기술 수입에 따른 국내 자본의 해외 유출 방지.
- 기반구조물의 설계는 강도설계법에서 점차 한계상태설계법으로 변경되는 것이 국제적 추세이며, 해외 건설시장에서 외국의 다국적 설계사는 AASHTO, Eurocode를 근간으로 자체 기준을 보유하고 있어 경쟁력이 높은 상태임.
 - 본 연구는 국내에서 건설되는 터널식 공동구 세그먼트 라이닝 설계에 한계상태 설계개념을 적용하기 위한 구체적인 설계매뉴얼을 제시한 것으로써, 국외 설계 기준과 대등한 수준으로 기술 자립화를 통해 국외 설계엔지니어링 경쟁력을 높이는 것이 주요 목표임.
- ㉡ 소단면 터널식 공동구의 설계시 기존의 허용응력설계법이나 강도설계법은 단일계수 및 하중계수를 이용하여 과다설계가 되는 사례가 많은 것으로 알려져 있음. 한계상태설계법은 재료가 가지는 내구성이나 최종적인 저항능력을 구조물에 작용하는 하중과의 관계로 평가하고 불확실성에 대한 신뢰성 분석을 기반으로 토목구조물을 설계하는 방법으로 최적화 설계가 가능하므로 비용절감 효과가 가능함.
- ㉢ 설계법의 세계적인 추세가 한계상태 설계개념으로 이동하고 있으며, 특히 지반구조물 분야는 주변지반특성 및 지하구조물(공동구)의 특성상 아직 한계상태 설계 개념이 정착되지 않고 있음. 한계상태 설계기술을 국내설계법에 도입하여 해외 설계 프로젝트 수주에 있어 경쟁력을 확보할 수 있으며, 선진국의 경우 많은 연구와 실제 적용이 이루어져 공동구의 내진해석 및 내진설계가 외국기술에 의해 이루어지고 있는 실정임. 따라서, 관련 산업의 경쟁력 강화를 위해서는 이에 대한 기술력 확보가 필요함.

③ 제1-3요소기술 : 도심지 소단면 터널식 공동구 건설단계 (계획·설계·시공)별 안전 위험요인을 고려한 안전관리기술 개발

- ㉠ 공동구 건설 중 발생할 수 있는 안전사고와 공기지연을 정립된 위험요인, 위험성평가 및 감소기법 개발을 통하여 선제적으로 차단함으로써, 결과적으로 공사비 절감에 기여함.
- ㉡ 도심지 소단면 터널식 공동구 재난관리(방재) 방안을 마련함으로써, 대구경 공동구, 지하대공간, 특수터널 등의 건설공사 중 유사 공종의 건설재해대응 방안 적용에 기대됨.

(나) 도심지 소단면 터널식 공동구 굴진을 예측기법과 급곡구간/특수지반 급속 시공기술 개발

- ① 제2-1요소기술 : 쉘드TBM 현장굴진자료 DATA분석을 통한 굴진성능 예측 및 안정기법 제시

- ㉔ 굴진율 오차율을 현 상태인 $40\pm 10\%$ 에서 목표치인 $20\pm 10\%$ 로 달성함에 따라 암반조건에 따라 압입깊이를 정확하게 예측할 수 있기 때문에 쉘드TBM의 장비성능 내 최적을 회전속도 등을 계획하여 시공할 수 있어 전력구 등 적기개통에 따른 전력수급 등 국민들이 서비스를 적기에 사용할 수 있으므로 국민이익 증가효과 예상됨.
- ㉕ 또한, 최적운전을 통해 계획되어 있던 공사기간 등의 단축을 통해 공사비용 절감의 효과가 있음. 더불어 쉘드TBM의 장비성능 내 적합한 운영을 통하여 장비 고장사고에 대한 예방효과가 기대됨.
- ㉖ 시추공간 암반상태 탐사기법을 통하여 암반상태가 불량하거나 파쇄대 구간 등의 위험구간을 사전에 예측하여 시공 중 Trouble을 감소할 수 있기 때문에 민원저감 및 사고예방 효과가 기대됨.
- ㉗ 쉘드TBM 굴진율 산정 프로그램 개발을 통해 오차율이 현 상태인 $40\pm 10\%$ 에서 목표치인 $20\pm 10\%$ 에 도달하면 연간 24억의 초과비용에서 대폭 절감할 수 있을 것으로 보임((주)날리지웍스, 2020). 사회적 측면에서는 공기지연 예방에 따른 민원저감, 토로점용기간 축소, 교통혼잡 예방 등 사회적 간접비용의 축소가 예상됨((주)날리지웍스, 2020).

② 제2-2요소기술 : 소단면 터널식 공동구 급곡구간(R30m 급) 쉘드 TBM 추진기술 및 중절장치 개발

- ㉔ 국내에서 일반적으로 R300m~500m 시공이 많으나 본연구는 도심지에서 일반적인 4차선으로 구성되는 사거리 교차로를 통과하고, 사유지 침범을 최소화할 위한 최대 곡률 반경 R30m 급곡 장치 개발을 통하여 공사비 절감이라는 경제성 효과 발생 예상함.
- ㉕ 급곡구간용 세그먼트 라이닝의 보강상세기술 개발을 통해 균열이나 파손, 누수, 내구수명 단축 등으로 이어지는 문제점을 해결하기 위한 유지관리 비용의 절감이 가능함. 소단면 터널식 공동구가 주로 시공되는 도심지의 설계 및 시공기술 향상에 기여하며, 외국기술에 의존하고 있는 터널장비 및 추진기술을 급곡구간 추진기술 개발을 통해 국산화하여 경제적 절감효과 뿐만 아니라, 향후 발주될 터널공사 시장에 긍정적인 영향을 미치고 국가 예산 절감도 가능할 것으로 예상됨. R=30m급 급곡구간 추진에 대한 핵심 기술 및 시공가이드가 확립됨에 따라 국내 도심지의 지하공간 활용의 수준이 증가 될 것으로 예상됨.
- ㉖ 선진사의 수입 대체 효과 및 중국 디스크커터 시장 진출에 기여 예상됨.

③ 제2-3요소기술 : 소단면 터널식 공동구 특수지반/특수조건 쉘드TBM 급속(downtime 40% 이하) 시공기술 개발

- ㉔ 특수지반 조우 시 다운타임의 저감으로 공사기간 축소 및 공사비 절감에 기여함.
- ㉕ 특수지반 보강 시 지상에서 수행되는 보강작업의 최소화로 교통혼잡 예방 및 민원저감에 기여함.
- ㉖ 특수지반에 적합한 디스크커터의 적용으로 디스크커터 소모량의 감소, 직접공사비 축소, 커터교체시간 절감에 기여함.

㉔ 특수지반 쉼트TBM현장의 지질적, 기계적 Downtime 발생요소에 대한 리스크 대응으로 인적/물적 사고를 사전에 예방하고, 이로 인한 인적/물적 손실을 최소화 할 수 있어 공기단축 및 공사비 절감에 기여함.

④ 제2-4요소기술 : 소단면 터널식 공동구 시공기술에 의한 소단면 터널식 공동구 성능 검증 시설 개발

㉕ 본 시설을 통해 사용한 TBM의 성능검증을 통해 사용된 TBM을 재사용할 수 있는 적합한 지반조건을 찾아내어 현장에 사용한 TBM을 투입함으로써, 새로운 TBM 제작에 소요되는 비용을 절감시킬 수 있음.

(다) 공동구용 수직구 급속시공을 위한 저소음/무진동 시공시스템, 보강/차수 기술 개발

본 연구의 개발을 통해 나타날 것으로 예상되는 경제적 파급 효과는 아래의 표와 같이 요약할 수 있음.

세부	개발전	개발후
3세부	- 수직구 굴착 공중복잡 경제성 저하 - 기술적 방지가 가능한(지하수 저감/지반침하/발파) 민원이 전체 민원의 34% 발생 - 도심지 시공시 저효율 할암공법 적용으로 공사비 증가 - 건설기계분야 국내업체 국내시장 점유율 10% 수준 - 수직구 굴착 공중복잡 경제성 저하 - 건설기계분야 국내업체 국내시장 점유율 10% 수준 - 수직구-터널 보강/차수장치 미적용 - 시멘트계/약액 등 차수재 사용 - 굴착공사로 인한 지반침하 중 지하수로 인한 원인이 약 20% 발생 - 시공/공용중 접속부 누수/열화 등 발생 - 시멘트/무기화합계열 차수재로 환경성 논란	- 수직구 공사비 절감 10% 이상 기여 - 암반굴착 시장 5% 확보시 최대 연간 800억원 매출 기대 - 건설기계분야 국내시장 매출 연간 220억원 증가 기여 - 공사비 절감 10% 이상(5년간 총 61억원 절감) - 건설기계분야 국내시장 매출 연간 220억원 증가 기여 - 차수장치 및 차수재 국내시장 1% 점유시 연간 90억원 매출 기대 - 높은 차수 성능을 지닌 차수장치 및 차수재와 신속한 수직구 굴착 공법 개발로 민원 30%저감 및 안전재해 20% 저감, 유지 보수비 절감 90%에 기여

① 제 3-1요소기술 : 공동구용 수직구 저소음/무진동 급속굴착(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발

㉖ 수직구 건설기술 자립화로 기술 수입으로 인한 국내 자본의 해외 유출 방지.

㉗ 소단면 공동구 수직구 공사의 누적 시장 규모를 5년간 국내 610 억원 추정, 수직구 급속 시공기술 개발로 공사비 10% 절감시 5년간 총 61억원 절감 추정.

㉘ 공동구 및 교통터널, 통신시설, 급/배수 등 지중시설 시공에 적용으로 공사비 10%

절감시 5년간 총 120 ~ 180억원 절감 추정.

- ㉠ 2015 기준 서울과 6대 광역시 공동구 공사로 인한 교통혼잡비용 235 억원의 50% 축소시 사회간접비용 약 120억원 절감 가능.
- ㉡ 암반굴착 시장 5% 확보시 최대 연간 800억원 매출 기대
- ㉢ 건설기계분야 국내시장 매출 연간 220억원 증가 기여
- ㉣ 지반침하 및 지하수 유출 방지, 공사기간 단축으로 인한 수해/사고 등 재해 안전성을 향상을 통한 안전재해 저감 20% 기여.

② 제 3-2요소기술 : 공동구용 수직구 하향식 라이닝 현타 급속(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발

- ㉠ 가시설 대폭 제외로 공사비 절감
- ㉡ 굴착직경 축소로 인한 공사비용 절감
- ㉢ 공동구 전체 공기 약 3~4개월 내외 공기 단축으로 직/간접비 절감
- ㉣ 국내외 공동구 시장 선진기술과 경쟁 기술력 확보로 국내 원가절감 및 외국 프로젝트 진출 기술력 확보
- ㉡ 가시설 장비 사용 발생 소음 감소에 따른 저소음 친환경 시공법
- ㉢ 친환경 하향식 공법에 따른 민원 감소, 안전사고 위험성 감소
- ㉣ 유사 수직구 (도로,철도,기타)공사현장 적용성 확대 가능

③ 제 3-3요소기술 : 공동구용 수직구 접속부 보강/차수장치(심도 20m 이상) 및 바이오폴리머 차수공법 개발

- ㉠ 차수장치 및 차수재 국내시장 1% 점유시 연간 약 90억원 매출 기대.
- ㉡ 경제적인 수직구 시공기술 보유로 해외 시장 점유율 확대.
- ㉢ 접속부 보강/차수 장치 적용시 공용 중 누수를 방지하고, 누수 손상에 의한 2차 열화 현상을 방지하여 시설물의 관리 효율 증대

(3) 정책적 측면

(가) 도심지 터널식 공동구 최적 설계용량산정 및 글로벌 표준화 설계기술 개발

- ① 제1-1요소기술 : 도심지 공동구 수용시설별(3종이상) 설계용량 및 단면 최적화 기술 개발
 - ㉠ 국토교통부의 “공동구 활성화 종합연구 용역”을 수행('19.10~'19.12)하여 공동구 관련 법 개정 및 지침 제안
 - ㉡ 공동구의 설치의무규모(200만㎡), 설치지역, 기본계획 등과 관련된 법 개정(제정)시 관련 연구에 대한 수요 증대

② 제1-2요소기술 : 터널식 공동구의 글로벌 표준화 설계법(LRFD) 개발

㉠ 신뢰성 기반의 설계를 위한 핵심 파라미터인 목표 신뢰도 지수와 하중 및 저항계수를 국내 실정에 맞춰 제시

③ 제1-3요소기술 : 도심지 소단면 터널식 공동구 건설단계 (계획·설계·시공)별 안전 위험요인을 고려한 안전관리기술 개발

㉠ 공동구 건설공사 안전관리 업무 및 대형재해 대응 업무를 공동구 건설기준 개정(안)에 반영 예정

㉡ 공동구 건설공사 안전관리 및 대형재해 대응 기술을 통해 공동구 및 유사 프로젝트 건설공사의 재해를 저감에 기여할 것이며, 설계안전성검토 등 건설안전 관련 제도 정착에 기여

(나) 도심지 소단면 터널식 공동구 굴진을 예측기법과 급곡구간/특수지반 급속 시공기술 개발

① 제2-1요소기술 : 쉘드TBM 현장굴진자료 DATA분석을 통한 굴진성능 예측 및 산정기법 제시

㉠ 기존의 획일적인 굴진을 산정방법에서 벗어나 범용적이고 예측 정확성 높은 산정기법의 개발로 소단면 쉘드TBM을 이용하여 공동구를 계획하고, 설계와 시공하는 지자체 및 공공기관에서 공사기간 및 공사비 산정 시 본 연구성과물 활용할 것으로 기대됨.

㉡ 공동구 및 쉘드TBM 장비를 이용하는 건설공사 현장에서 적극적으로 실시간 굴진데이터를 활용할 것이며 이에 따라 시공효율을 향상시키고 안전한 장비운행을 할 수 있는 방안이 도입될 것으로 판단됨.

㉢ 쉘드TBM을 이용하는 기관에서는 본 연구로 개발된 순굴진을 산정방법 및 프로그램에 대하여 자체 기준 및 지침에 반영하여 활용할 것으로 판단됨.

② 제2-2요소기술 : 소단면 터널식 공동구 급곡구간(R30m 급) 쉘드 TBM 추진기술 및 중절장치 개발

㉠ R=30m이하의 급곡구간용 세그먼트 라이닝의 제작 및 시공기술 개발함으로써 토지 보상비용 저감으로 SOC 관련 정부 예산 축소 가능함.

㉡ 세그먼트 이음부 방수기술의 확보로 인한 공동구 터널의 건설 및 운영을 안전적으로 유지 및 관리 가능함.

③ 제2-3요소기술 : 소단면 터널식 공동구 특수지반/특수조건 쉘드TBM 급속(downtime 40% 이하) 시공기술 개발

㉠ 현재 터널 시공과 관련한 전문 지침에는 특수지반에 대한 고려가 매우 부족한 상황 이므로 특수지반 급속시공 매뉴얼의 검증을 통해 터널 시방서, 매뉴얼 등 전문 지침

에 특수지반 대응 기술 반영 가능함.

- ㉔ 쉘드TBM을 활용한 도심지 공동구 건설 시 많은 문제를 발생시키는 특수지반에 효과적으로 대응 가능한 기술의 개발로 터널 공사 발주 시 발파공법 대비 쉘드TBM의 선정 타당성 제고함.
- ㉕ 특수지반 쉘드TBM현장의 운용조건 및 장비선정 기법 개발을 통한 가이드라인을 구축함으로써, 시방서 혹은 정책 제안이 가능함.

④ 제2-4요소기술 : 소단면 터널식 공동구 시공기술에 의한 소단면 터널식 공동구 성능 검증 시설 개발

- ㉖ TBM은 고가의 장비이기 때문에 재사용을 장려하는 정책이 필요함. 따라서, 재사용 TBM의 성능을 본 시설을 통해 파악하는 것이 중요하기 때문에 본 시설사용에 대해 국가에서 지원이 필요함.

(다) 공동구용 수직구 급속시공을 위한 저소음/무진동 시공시스템, 보강/차수 기술 개발

- ㉗ 해당사항 없음.
-

제5장. 연구개발성과의 활용계획

1. 도심지 터널식 공동구 최적 설계용량산정 및 글로벌 표준화 설계기술 개발

본 연구에서는 중요 안전 취약 공종 중 하나인 도심지 소단면 터널식 공동구의 수요가 증가 됨에 따라 시공 중 대형건설재해(화재, 침수, 지진 등)의 발생 빈도를 감소시키기 위해 재해 대응 기술을 개발하였다. 현재 국내에는 공동구 시공 중 발생 가능한 대형건설재해에 대한 안전 확보 기준이 전무한 상태이고, 공동구 유지관리 측면에 치중된 국내 매뉴얼에서 제시되지 않은 터널식 공동구 시공 중 발생 가능한 대형건설재해에 대한 안전 대응 기술이 필요하다.

따라서 본 연구에서 공동구 시공 중 재해 위험요인을 발굴하여 각 재해 유형 별 위기경보 단계 및 발생 시나리오를 작성하였고, 작성된 연구 성과를 바탕으로 기존 매뉴얼과 차별화된 안전 대응 기술을 개발하였다. 해당 기술은 공동구 건설 공사에서 현장 특성에 맞게 유동적으로 수정하여 사용한다면 인적·물적피해를 감소시킬 뿐만 아니라 시공비 및 공기를 단축시킬 수 있을 것으로 예상된다.

<표 5.1.1> 1세부 기관별 핵심 연구성과 및 핵심기술의 활용방안

과제명 (세부과제명)	해당기관명	핵심연구 성과물	요소기술	수요처	활용방안
1세부: 도심지 터널식 공동구 최적 설계용량산정 및 글로벌 표준화 설계기술 개발	한국토지 주택공사 토지주택 연구원	도심지 공동구 수용시설별 설계용량 최적화 연구	1-가. 수용시설에 따른 설계용량을 최적화 및 현장 적용성 평가 보고서	• 지자체 • 설계사	• 지역별 공동구 기본계획시 TOOL 활용 가능
	(주)대정 건설턴트	터널식 공동구 단면 최적화 설계법	1-나. 터널식 공동구 단면 최적화 설계법	• 지자체 • 설계사	• 지역별 공동구 기본계획시 TOOL 활용 가능
	(주)한국종합 기술	도심지 유형별 공동구 설치 타당성 평가시스템 개발	1-다. 도심지 유형별 타당성 평가시스템	• 기존 도심지를 대상으로 공동구의 도입 및 타당성, 기본계획을 수립할 수 있는 지방자치단 체	• 서울특별시 지하시설물 통합안전관 리 대책의 일환으로 도심지 소단면 공동구 반영(19년 8월, 서울 특별시)

과제명 (세부과제명)	해당기관명	핵심연구 성과물	요소기술	수요처	활용방안
				(서울시, 부산시, 인천시, 대구시 등) • 지방자치단체를 대상으로 타당성 및 기본계획 수립 용역을 수행하는 연구기관 및 설계업체	• 국토교통부 공동구 활성화 종합연구 용역 중 타당성 평가시스템 관련 내용 적용(19년 12월, 국토교통부) • 도심지 공동구 관련 지침서 중 타당성 평가시스템 부분이 반영되어 향후 서울시 등 지자체 등에서 활용 가능
	유니콘스(주)	도심지 터널식 공동구 설치에 위한 LCC 표준공정 및 공사비 관리시스템	1-라. 공동구에 대한 LCC 공사/공정 프로그램	• 지자체 • 설계사	• 지역별 공동구 기본계획시 TOOL 활용 가능
	한국건설기술연구원	터널식 공동구 한계상태설계 기준	1-마. 터널식 공동구 한계상태설계 기준	• 설계사, 시공사	• 설계기준 반영
	(주)평화엔지니어링	한계상태설계법을 활용한 터널식 공동구 세그먼트라이닝 설계법	1-마. 한계상태설계법에 의한 터널식 공동구 라이닝 설계 기술 개발	• 설계사, 시공사	• 설계매뉴얼 제시 / 터널식 공동구 및 전력구 사업에 2021년 이후 적용
	(주)희송지오택	터널식 공동구의 글로벌 표준화 설계법 (LRFD) 개발	1-사. 글로벌 표준화 설계법 적용을 위한 국내 지반 특성값 평가 기법 개발	• 토목, 건설 관련 발주처, 시공사, 설계사, 동종 업체 등	• 터널식 공동구를 포함하여 각종, 토목, 건축 설계시 지반특성값 활용

과제명 (세부과제명)	해당기관명	핵심연구 성과물	요소기술	수요처	활용방안
	(주)우성디앤씨	공동구 내진설계법	1-아. 글로벌 표준화 설계법 적용을 위한 내진해석 및 내진설계 기술개발	• 설계사, 시공사	• 설계기준 반영
	한국시설 안전공단	공동구 건설공사 안전관리 업무 매뉴얼 및 공동구 건설공사 위험요소·저감 대책	1-자. 도심지 소단면 터널식 공동구 건설단계별 안전 위험요인을 고려한 안전관리기술 개발	• 공동구 및 유사 건설공사의 발주처, 설계사, 시공사	• 공동구 계획, 설계, 시공단계 안전관리 업무를 ‘공동구 건설기준 개정(안)’에 반영
	인천대학교 산학협력단	도심지 소단면 터널식 공동구 시공 중 대형 건설재해 대응 매뉴얼	1-차. 도심지 소단면 터널식 공동구 시공 중 대형건설재해 대응 기술 개발	• 공동구 건설공사 발주자, 설계자 및 시공사 등	• 공동구 시공 중 대형건설재 해 대응 매뉴얼을 통한 ‘공동구 건설기준 개정(안)’에 반영

가. 도심지 공동구 수용시설별 설계용량 최적화 연구 (한국토지주택공사 토지주택연구원)

(1) 기술개요

지역에 적합한 공동구 종수 결정 및 평가를 통한 수용시설물 분석

(2) 연구개발성과 수요기업 및 현장적용 기관/업체

연구개발성과 수요처 : 지자체, 설계사

(3) 성과 활용을 위한 활동

(가) 국토부와 ‘공동구 활성화 종합연구 용역’ 완료 후 「국토계획법 개정(안)」 또는 「공동구법 제정(안)」 기제출/ 개(제)정 시기는 국토교통부 내부사정으로 현재 미정임/ 개정 내용 : 공동구 관리 비용 분담관련 사항, 공동구 설치 의무 규모, 공동구설치를 위한 기본 계획 수립 등

(나) 관련 법 개정시 ‘공동구 기본계획/설치계획 등’에 대한 법률 추가 예정

나. 도심지 터널식 공동구 단면 최적화 설계 기술 개발 (㈜대정컨설팅트)

(1) 기술개요 : 공동구내 수용시설물 배치를 위한 배치기준 및 단면설계

(2) 연구개발성과 수요기업 및 현장적용 기관/업체

연구개발성과 수요처 : 지자체, 설계사

(3) 성과 활용을 위한 활동

(가) 국토부와 ‘공동구 활성화 종합연구 용역’ 완료 후 공동구 설계기준 개정(안) 제출 예정/ ‘20. 9월말 기준위 제출/ 11월말 중심위/ 12월말 개정완료/ 개정내용 : 수용시설별 터널 설계단면

(나) 관련 법 개정시 ‘공동구 기본계획/설치계획 등’에 대한 법률 추가 예정

다. 도심지 유형별 공동구 설치 타당성 평가시스템 개발 (㈜한국종합기술)

(1) 기술개요

공동구 설치 목적 및 도시 유형에 따라서 세분화된 평가지표 항목을 설정하고 항목별 정량적 평가를 통한 도심지 공동구 설치 타당성 평가시스템의 개발과 지표 항목별 방대한 입력자료를 정량적으로 평가할 수 있는 통합프로그램 중 타당성 평가모듈 부분의 개발

(2) 연구개발성과 수요기업 및 현장적용 기관/업체

(가) 연구개발성과 수요처 : 기존 도심지를 대상으로 공동구의 도입 및 타당성, 기본계획을 수립하기 위해서 용역을 발주할 수 있는 지방자치단체로써 서울특별시, 부산광역시, 인천광역시 등의 지방 중심지 도로의 관리청

(나) 연구개발성과의 현장적용 기관 및 업체 : 기존 도심지를 대상으로 공동구의 도입 및 타당성, 기본계획 용역이 지방자치단체로부터 발주될 경우에 이를 직접 수행할 수 있는 한국건설기술연구원 등의 국내 건설·교통관련 연구기관 및 연구기관을 보조할 수 있는 엔지니어링 업체

(3) 성과 활용을 위한 활동

(가) 서울시-공동구 연구단의 기술협약(MOU)를 바탕으로 「서울특별시 지하시설물 통합안전관리 대책」의 일환으로 도심지 소단면 공동구 반영(19년 8월, 서울특별시)

① 서울시는 개별 관리되고 있는 Life-Line의 통합관리 체계 구축을 위한 추진전략 수립

② Life-Line의 통합관리로 지하시설물의 효율적 관리가 가능한 도심지 공동구를 확대 적용하기 위한 추진과제 선정 등의 정책 반영



<그림 5.1.1> 서울시 지하시설물 통합안전관리 대책의 일환으로 도심지 공동구 반영

(나) 국토교통부의 「공동구 활성화 종합연구 용역」 중 타당성 평가시스템 관련 내용 적용(19년 12월, 국토교통부)

(다) 국토교통부는 향후 도심지 공동구 관련 지침서 중 타당성 평가시스템에 대한 주요 내용을 관련 지침서 등에 반영 예정(20년 하반기, 국토교통부)

라. 도심지 터널식 공동구 설치를 위한 LCC 표준공정 및 공사비 관리시스템 개발 (유니콘스(주))

(1) 기술개요

공동구 설치 관련 공사비 및 공사기간 산정을 위한 분석

(2) 연구개발성과 수요기업 및 현장적용 기관/업체

연구개발성과 수요처 : 지자체, 설계사

(3) 성과 활용을 위한 활동

(가) 국토부와 ‘공동구 활성화 종합연구 용역’ 완료 후 「국토계획법 개정(안)」 또는 「공동구법 제정(안)」 기제출/ 개(제)정 시기는 국토교통부 내부사정으로 현재 미정임/ 개정 내용 : 공동구 관리 비용 분담관련 사항, 공동구 설치 의무 규모, 공동구설치를 위한 기본 계획 수립 등

(나) 관련 법 개정시 ‘공동구 기본계획/설치계획 등’에 대한 법률 추가 예정

마. 글로벌 표준화 설계요소기술 개발 및 최적 설계기준 정립 (한국건설기술연구원)

(1) 기술개요

신뢰성 기반의 설계를 위한 핵심 파라미터인 목표 신뢰도 지수와 하중 및 저항계수를 국내 실정에 맞춰 제시함으로써, 공동구 구조물 관련 설계기술을 국제 표준화 기구의 요구 조건을 만족시킨 국제 경쟁력을 지닌 설계법

(2) 연구개발성과 수요기업 및 현장적용 기관/업체
터널식 공동구 및 전력구 사업을 수행하는 설계사, 시공사

(3) 성과 활용을 위한 활동

(가) 국토교통부 ‘공동구 활성화 종합연구 용역’ 수행을 통한 기준 반영 노력

(나) 공동구 설계기준 개정(안) 제출 예정/ ‘20. 9월말 기준위 제출, 11월말 중심위/ 12월말 개정완료/ 개정내용 : 터널식 공동구 설계기준

(다) 진행 중인 실시설계 사업에 시범적용 및 적용결과 평가 분석 노력

바. 한계상태설계법에 의한 소단면 터널식 공동구 라이닝 설계 기술 개발 (주)평화엔지니어링)

(1) 기술개요

글로벌설계법인 한계상태설계법에 의한 소규모 공동구 터널의 세그먼트라이닝 설계법을 개발하고 한계상태설계법에 의한 세그먼트라이닝 설계매뉴얼을 제시함

(2) 연구개발성과 수요기업 및 현장적용 기관/업체

연구개발성과 수요처 : 터널식 공동구 및 전력구 사업을 수행하는 설계사, 시공사

(3) 성과 활용을 위한 활동

(가) 국내 소규모 전력구 터널의 세그먼트라이닝 설계사례를 바탕으로 예비설계, 계획설계를 수행하여 한계상태설계법의 적용성을 검토

(나) 설계매뉴얼 작성 시 세그먼트 라이닝 설계를 위한 검토항목에 대한 설명과 함께 부록으로 예제를 수록하여 실무자가 편리하게 활용 가능하도록 하였음

(다) 본 설계매뉴얼은 쉘드 TBM으로 굴착되는 터널식 공동구에 관한 것으로서 독립적으로도 활용이 가능하지만, 개착식 공동구에 대한 한계상태설계법 연구결과와 함께 공동구에 포함되는 구조물 전체를 한계상태설계법으로 설계하는데 필요한 가이드라인으로 활용할 수 있음

(라) 한전 연구원이 본 연구과제 연구기관으로 참여하고 있어 성과공유에 유리하고, 한전과 업무협약(MOU)을 체결하여 협력관계를 유지하는 등 구체적으로 활용될 수 있도록 하였음

사. 글로벌 표준화설계법 적용을 위한 국내 지반특성값 평가기법 개발 (주)희송지오테크)

(1) 기술개요

시험자에 따라 달라질 수 있는 전단판 상승속도, 육안 확인을 통한 다이얼게이지의 전단강도 확인 등의 변수를 최대한 줄이기 위하여 일정한 속도로 전단판 상승제어가 가능한 전자동 장치와 디지털게이지를 통하여 일관성 있고 정확한 전단강도 측정이 가능한 ‘풍화대강도특성 측정장치’를 개발함

(2) 연구개발성과 수요기업 및 현장적용 기관/업체

지반의 강도특성은 구조물 설계의 필요항목인 만큼 도로, 철도, 항만 댐 등과 같은 대부분의 토목구조물 설계에 적용이 가능함

(3) 성과 활용을 위한 활동

(가) 1차 테스트베드 검증: 2018년 장안~온산 국도건설공사 현장에 10회 적용

(나) 2차 테스트베드 검증: 2019년 강원도 양양의 00부대에서 10회 적용

**아. 글로벌 표준화 설계법 적용을 위한 내진해석 및 내진설계 기술개발
(주우성디앤씨)**

(1) 기술개요

철도 터널 구조물의 내진해석 및 내진설계에 적용 가능한 기술로, 기존의 설계법이 경험의 기초한 설계법인 반면에 개발한 설계법은 신뢰성 분석을 기반으로 합리적인 설계법으로 기존 설계법 대비 구조물이 일관성 있는 적정수준의 안전율, 즉 최적의 목표신뢰도를 갖도록 하는 보다 합리적인 설계법

(2) 연구개발성과 수요기업 및 현장적용 기관/업체

연구개발성과 수요처 : 터널식 공동구 및 전력구 사업을 수행하는 설계사, 시공사

(3) 성과 활용을 위한 활동

(가) 공동구 설계기준 개정(안) 제출 예정/ '20. 9월말 기준위 제출, 11월말 중심위/ 12월말 개정완료/ 개정내용 : 터널식 공동구 설계기준(내진설계편)

(나) 진행중인 실시설계 사업에 시범적용 및 적용 결과 평가 분석

**자. 도심지 소단면 터널식 공동구 건설단계별 안전위험요인을 고려한 안전
관리기술 개발 (한국시설안전공단)**

(1) 기술개요

(가) 도심지 소단면 터널식 공동구 건설공사의 위험요소를 발굴하고 계획, 설계, 시공 단계별 저감대책 개발

(나) 도심지 소단면 터널식 공동구 건설공사의 건설단계(계획, 설계, 시공)별 안전관리 업무 및 설계안전성검토 절차가 제시된 매뉴얼 개발

(다) 개발된 위험요소 및 저감기법과 공동구 건설공사 안전관리 매뉴얼에 대하여 공동구 및 유사 건설공사에 활용될 수 있을 것이며, 본 연구를 통해 공동구 안전사고 절감에 기여할 수 있을 것으로 기대됨

(2) 연구개발성과 수요기업 및 현장적용 기관/업체

국토교통부와 공동구 및 유사 건설공사의 발주처, 설계사, 시공사 등

(3) 성과 활용을 위한 활동

(가) 실적

- ① 공동구 활성화 법·정책 마련을 위한 국토교통부 발주 연구에 참여하여, 공동구 계획, 설계, 시공단계 안전관리 업무를 ‘공동구 건설기준 개정(안)’에 반영

(나) 계획 및 진행사항

- ① 반영된 건설기준 개정(안)을 최종 지침에 적용될 수 있도록 국토교통부 등과 협의 실시/공동구 설계기준 개정(안) 제출 예정/ ‘20. 9월말 기준위 제출, 11월말 중심위/ 12월말 개정완료/ 개정내용 : 설계단계에서 고려할 안전관리 사항
- ② 국토교통부 건설안전 관련 시스템에 발굴한 위험요소 및 저감대책 반영
- ③ 연구성과를 국토교통부 시스템인 건설공사 안전관리 종합정보망(CSI) 반영을 추진 하여 관련사항 홍보 및 교육 등에 참여 예정

No.	공종명	위험요소	대책명		대책	대책의 기대효과	이행	비고
			조직적대책	기술적대책				
1	수요조사	공동구 건설기준 개정(안)을 위한 연구발주 및 연구수행	국토교통부 발주	국토교통부 발주	공동구 건설기준 개정(안)을 위한 연구발주 및 연구수행	공동구 건설기준 개정(안)을 위한 연구발주 및 연구수행	공동구 건설기준 개정(안)을 위한 연구발주 및 연구수행	공동구 건설기준 개정(안)을 위한 연구발주 및 연구수행
2	설계	공동구 건설기준 개정(안)을 위한 연구발주 및 연구수행	국토교통부 발주	국토교통부 발주	공동구 건설기준 개정(안)을 위한 연구발주 및 연구수행	공동구 건설기준 개정(안)을 위한 연구발주 및 연구수행	공동구 건설기준 개정(안)을 위한 연구발주 및 연구수행	공동구 건설기준 개정(안)을 위한 연구발주 및 연구수행
3	시공	공동구 건설기준 개정(안)을 위한 연구발주 및 연구수행	국토교통부 발주	국토교통부 발주	공동구 건설기준 개정(안)을 위한 연구발주 및 연구수행	공동구 건설기준 개정(안)을 위한 연구발주 및 연구수행	공동구 건설기준 개정(안)을 위한 연구발주 및 연구수행	공동구 건설기준 개정(안)을 위한 연구발주 및 연구수행
4	유지관리	공동구 건설기준 개정(안)을 위한 연구발주 및 연구수행	국토교통부 발주	국토교통부 발주	공동구 건설기준 개정(안)을 위한 연구발주 및 연구수행	공동구 건설기준 개정(안)을 위한 연구발주 및 연구수행	공동구 건설기준 개정(안)을 위한 연구발주 및 연구수행	공동구 건설기준 개정(안)을 위한 연구발주 및 연구수행
5	연구개발	공동구 건설기준 개정(안)을 위한 연구발주 및 연구수행	국토교통부 발주	국토교통부 발주	공동구 건설기준 개정(안)을 위한 연구발주 및 연구수행	공동구 건설기준 개정(안)을 위한 연구발주 및 연구수행	공동구 건설기준 개정(안)을 위한 연구발주 및 연구수행	공동구 건설기준 개정(안)을 위한 연구발주 및 연구수행

<그림 5.1.2> 공동구 건설공사 안전관리 업무 매뉴얼 및 건설기준 반영(안)

차. 도심지 소단면 터널식 공동구 시공 중 대형건설재해 대응 기술 개발 (인천대학교 산학협력단)

(1) 기술개요

도심지 소단면 터널식 공동구 시공 중 발생 가능한 대형건설재해(화재·침수·지진) 대응에 활용 가능한 안전 대응 매뉴얼 개발

(가) 도심지 소단면 터널식 공동구 시공 중 발생 가능한 대형건설재해에 대한 국내 안전 확보 기준이 미비한 실정에서 공동구 시공 특성을 반영한 안전 대응 기술 개발

(나) 기존의 재난 대응 매뉴얼은 그 분량이 방대하고 산만하게 구성되어 있어 재난 발생 시 대응 주체들이 수행해야 할 역할을 파악하는데 어려움이 있지만, 해당 기술은 재난 발생 시 대응 주체들의 행동요령을 간결하게 제시하여 후속 대처과정을 체계적이고 효율적으로 확인 가능

(2) 연구개발성과 수요기업 및 현장적용 기관/업체

공동구 건설 공사 발주자, 설계자 및 시공자 등

(3) 성과 활용을 위한 활동

(가) 실적

- ① 연구를 통해 개발된 공동구 시공 중 발생 가능한 대형건설재해에 대한 안전 대응 대책을 ‘공동구 건설기준 개정(안)’에 반영

(나) 계획 및 진행사항

- ① 반영된 건설기준 개정(안)을 최종 지침에 적용될 수 있도록 국토교통부 등과 협의 실시/공동구 설계기준 개정(안) 제출 예정/ ‘20. 9월말 기준위 제출, 11월말 중심위/ 12월말 개정완료/ 개정내용 : 설계단계에서 고려할 안전관리 사항
- ② 해당 연구에서 개발된 안전 대응 대책을 1-3a 시설안전공단의 연구성과와 함께 반영하여 예상 수요자에게 교육 될 수 있도록 진행

2. 도심지 소단면 터널식 공동구 굴진율 예측기법과 급곡구간/특수지반 급속 시공기술 개발

본 연구에서는 도심지 터널식 공동구의 굴진율 예측기법을 개발하였고, 급곡구간 및 특수지반 시공기술을 개발하였다. 또한, 터널식 공동구 성능검증 시설을 구축하였다. 이에 총 12기관별 핵심 연구성과 및 핵심기술의 활용방안을 다음 <표 5.2.1>에 기술하였다.

<표 5.2.1> 2세부 기관별 핵심 연구성과 및 핵심기술의 활용방안

과제명 (세부과제명)	해당기관명	핵심연구 성과물	요소기술	수요처	활용방안
2세부: 도심지 터널식 공동구의 굴진율 예측 및 급곡구간/특수 지반 시공기술	한국전력공사 전력연구원	셴트TBM 현장굴진자료 DATA분석을 통한 굴진성능 예측 및 산정기법 제시	2-가. 소단면 터널식 공동구 셴트TBM의 현장굴진자료 DB구축/굴진 율 산정기법 제시	한국전력공사	- 굴진율 모델을 시공단계에 있는 OO-OO 전력구 터널현장에 적용 및 최적인 방안 제시(2020년 상반기) - 사내 실무자참사에 셴트TBM DB 구축 및 굴진율 산정방법 수록(2020년 상반기) - 사내 건설본부에 굴진율 DB 관리 시스템

					적용 (2020년 상반기)
	인하대학교 산학협력단		2-나. 소단면 쉴드 TBM 복합지반 (토사/암반지반) 실굴진을 예측 모델 제시	한국전력공사	개발된 프로그램을 시공단계에 있는 OO-OO 전력구 터널현장에 적용 (2020년 상반기)
	이엠코리아(주)	소단면 터널식 공동구 급곡구간 (R30m 급) 쉴드TBM 추진기술 및 중절장치 개발	2-다. 도심지 소단면 (Φ3.5m 급) 급곡 구간(R30m 급) 장비개발	- 아주지오텍 - 동아지질 - 특수건설 - 삼보 LT - 강릉건설	공동구 전력구 터널 공사 사업입찰 제안 제출
	호서대학교 산학협력단		2-라. 급곡구간 소형 쉴드TBM 세그먼트 및 굴진 안정을 위한 시공기술 개발	- 사공사 - 엔지니어링 회사	시공가이드 라인 (지침서)를 통한 급곡구간 시공지침 제시
	(주)콘택이엔지		2-마. 급곡구간 세그먼트 라이닝 기술 개발을 위한 세그먼트 보강상세 및 최적형상개발	KC산업	기술이전
	건국대학교 산학협력단		2-바. 지수재 최적화를 통한 급곡구간 이음부 방수시스템 및 시공기술 개발	- 사공사 - 엔지니어링 회사	기술이전을 통한 실용화 및 사업화
	부산대학교 산학협력단		2-사. 워터젯을 이용한 급곡구간 여굴생성 기술개발	TBM 장비제작 회사	설계반영, 제작회사의 MOU 및 특허 활용
	서울대학교 산학협력단		2-아. 특수지반분류 및 쉴드 TBM	- 공공사업기관/ 지자체 - 토목건설/	국내 설계/시공 예정 중인 쉴드TBM

		급속시공기술	효율적 통과기법 개발	설계회사	현장에 대한 기술자문 및 설계 검토 수행 예정 (예상현장: GTX-A, 김포-과주)
			2-차. 특수지반 최적보강 설계매뉴얼	- 발주처 - 설계 및 시공사	- 국내 설계 및 시공결과와 본 연구결과 비교를 통한 기술검증 및 보완 - 관련 공사 설계 참고자료로 반영
			2-차. 셸드 TBM 최적운용조건 및 장비선정 가이드라인	- TBM부대품 제조업체 - TBM 시공 전문업 체	- 셸드TBM 현장 적용을 통한 기술 검토 및 보완 - 실용화를 위한 특허등록 및 TBM부대품 제작시 기술조건 반영
			2-차. 특수지반용 디스크 커터	동아지질, 아주지오텍, 강릉건설, 특수건설	2020년 00현장 적용하여 시제품 성능 검증 - 국내 TBM 공법이 적용되는 터널 현장 별로 밀착 영업하여 매출로 전개 예정
	한국과학기술원 산학협력단	소단면 TBM 실대형 성능검증 시설	2-차. 소단면 터널식 공동구 시공기술에 의한 소단면 터널식 공동구 성능검증 시설 개발	- 공동구연구단T BM 기술개발 검증이 필요한 모든 기관 - TBM 발주처	- TBM 성능검증 - TBM 기술검증 - TBM 운용 교육

가. 소단면 터널식 공동구 쉴드TBM의 현장굴진자료 DB구축/굴진을 산정 기법 제시 (한국전력공사 전력연구원)

(1) 기술개요

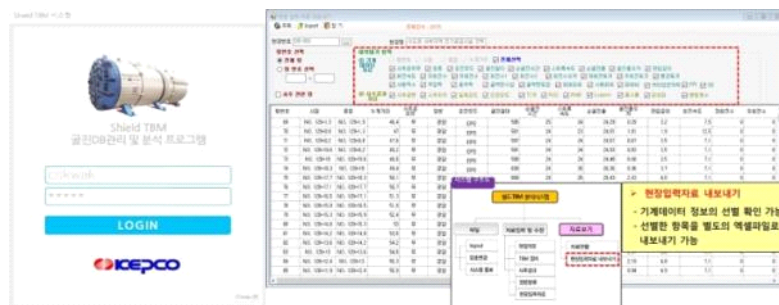
- (가) 개발한 굴진율DB 관리 시스템은 소단면 쉴드TBM으로 시공한 현장에 대해 현장개요, TBM 장비정보, 시추결과, 암반분류, 기계데이터에 대해 효율적으로 DB를 구축하고, 각 주요인자간 상호관계 분석을 자동화하여 주는 프로그램임.
- (나) 본 연구에서 개발한 순굴진율 산정방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있음. 1) 각 현장별 통계분석을 통한 굴진율 회귀식 모델, 2) 범용적으로 사용가능하고, 실험형 굴진실험을 통해 도출한 순굴진율 산정방법(KEPCO 모델)임. 디스크커터 당 연직력(추력)과 암반의 일축압축강도를 반영한 ㉠ 연직력-압입깊이 모델, ㉡ 연직력-회전력 모델, ㉢ 토크-회전속도 모델로 구성됨.
- (다) 시추공 간 지반조사의 한계점을 극복하고자 전기비저항값과 암반특성(일축압축강도, RQD, RMR, Q-system)과의 상관관계를 도출함.

(2) 연구개발성과 수요기업 및 현장적용 기관/업체

연구개발성과 수요처 : 한국전력공사

(3) 성과 활용을 위한 활동

- (가) 사내 건설본부 및 전력연구원 내 쉴드TBM 굴진율 DB 관리 시스템 적용 (2020년 상반기)



<그림 5.2.1> 쉴드TBM 굴진율 DB 관리 시스템

- (나) 개발된 순굴진율 산정방법을 시공단계에 있는 OO-OO 전력구 터널현장에 적용하여 암반특성에 따라 압입깊이와 순굴진율 예측 및 장비성능 내 최적 운전조건 제시 완료
- (다) 개발한 굴진율 DB 관리 시스템 및 순굴진율 산정방법 은 사내 실무지침서에 수록하여 전사 적용하는데 활용하고자 함. (2020년 상반기)

나. 소단면 쉴드 TBM 복합지반(토사/암반지반) 실굴진율 예측 모델 및 프로그램 개발 (인하대학교 산학협력단)

(1) 기술개요

본 프로그램은 소단면 쉴드TBM 터널 현장에서 획득할 수 있는 다양한 지반 및 기계 데이터를 기반으로하여, 쉴드TBM 순굴진율을 예측하는 프로그램임. 예측 프로그램에 사용된

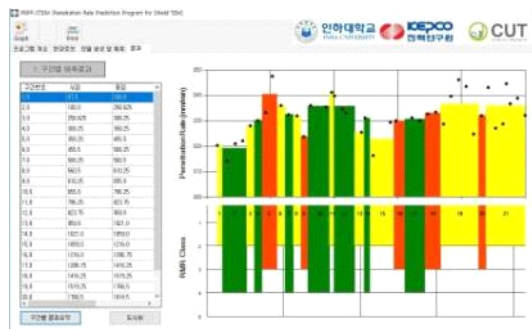
메인 알고리즘은 Gradient Boosted Regression Tree (GBRT)이며, python (version 3.5.4) 프로그래밍 언어를 사용해서 개발하였음.

(2) 연구개발성과 수요기업 및 현장적용 기관/업체

연구개발성과 수요처 : 한국전력공사

(3) 성과 활용을 위한 활동

(가) 개발된 프로그램을 시공단계에 있는 OO-OO 전력구 터널현장에 적용 (2020년 상반기)



<그림 5.2.2> 쉴드 TBM 순굴진을 예측 프로그램

다. 공동구(직경 3.5m급) 급곡(R30m) 시공을 위한 급곡 장치 개발 (이엠코리아㈜)

(1) 기술개요

쉴드TBM 시공 시 수많은 지장물이 존재하며 노선 선정에 악 영향을 주고 지장물 완곡 우회로 인한 연장 및 심도증가로 공사비 증가 요인을 발생시킨다.(부지점유, 민원, 교통 체증 증가, 공사비 상승) 이에, 경제성을 고려할 때 도심지에서 사유지 침범을 최소화 하고 기존 지장물을 통과 하기 위해서는 급곡 구간 장치 및 장비, 시공기술 개발이 시급하였다. 국내에서 일반적으로 R300m~500m의 커브 구간 시공이 보편적으로 시행되었다. 본 연구는 도심지에서 일반적인 4차선으로 구성되는 사거리 교차로를 통과하고, 사유지 침범을 최소화를 위한 최대 곡률 반경 R30m 급곡 장치 개발을 통하여 공사비 절감 및 쉴드장비 100% 해외수입에 의존하는 실정으로 국내 자본 유출 방지 목적 등으로 쉴드 장비 급곡 장치가 필요하다.

(2) 연구개발성과 수요기업 및 현장적용 기관/업체

연구개발성과 수요처 : 아주지오텍, 동아지질, 특수 건설, 강릉건설 등

(3) 성과 활용을 위한 활동

(가) 국내 공동구(전력구) 터널 시공 공사 장비 제작사 입찰(서울 동남권 전력구 공사, 김해, 강서 전력구 공사, 인천지역 전력구 공사, 평택지역 전력구 공사 장비제작사 입찰 제안서 제출)

라. 급곡구간 소형 쉘드TBM 세그먼트 및 굴진 안정을 위한 시공기술 개발 (호서대학교 산학협력단)

(1) 기술개요

국내지반 특성에 맞는 급곡구간 쉘드TBM 추진시스템 개발 및 쉘드 TBM 급곡구간 시공 가이드라인 제시 및 가이드라인 현장적용 검증, 급곡구간 소형 쉘드 TBM 시공가이드라인 개발 및 제시

(2) 연구개발성과 수요기업 및 현장적용 기관/업체

(가) 연구개발성과 수요처 : 시공사, 엔지니어링회사

(3) 성과 활용을 위한 활동

(가) 실험형 시공에 앞서 예측 시뮬레이션 가능한 축소 모형 급곡구간 터널 굴착 장치 개발

(나) 향후 급곡구간 쉘드 TBM 시공시 설계사 및 건설사에서 반영 가능하도록 설계 및 시공에 필요한 가이드라인 설계 지침을 제안하여 국가 규준에 반영 추진할 계획



(a) 축소 모형실험



(b) 쉘드TBM 급곡구간 시공 가이드라인 제시

<그림 5.2.3> 급곡구간 쉘드 TBM 시공가이드라인 개발 관련 실용성과

마. 급곡구간 세그먼트 라이닝 기술 개발을 위한 세그먼트 보강상세 및 최적형상 개발 (㈜콘텍이엔지)

(1) 기술개요

쉘드 TBM 터널은 공공 도로하부에 계획하는 경우가 많으며, 그 선형은 도로 선형에 지배되고 있다. 국내의 경우 쉘드 TBM 터널은 일반적으로 R300 m 시공이 많으나, 도심지에서 사유지 침범을 최소화하고 기존 구간을 통과하기 위해서는 급곡구간 시공이 필요하다.

RC세그먼트는 급곡구간 시공시 편심에 의해 파괴될 수 있으며, 세그먼트 폭 축소에 따른 철근 배근 어려움으로 곡선구간은 강재세그먼트가 주로 사용되고 있다. 그러나, 강재세그먼트는 자체 부식에 의한 내구성 저하와 그에 따른 내구연한이 감소되는 문제가 발생하기 때문에 강재세그먼트를 대체할 수 있는 급곡구간 세그먼트가 필요하다.

본 연구를 통해 급곡구간(R=30m)에 적용이 가능한 구조용 합성섬유 및 라텍스를 사용한 고강도 고인성 세그먼트 재료 및 Plate형의 유리섬유강화 플라스틱을 보강재로 적용한 FRP Plate 세그먼트를 개발하였다.

(2) 연구개발성과 수요기업 및 현장적용 기관/업체

(가) 연구개발성과 수요처 : (주)KC산업

(3) 성과 활용을 위한 활동

(가) 현재 실용화 추진 단계로 기존 세그먼트 전문제작업체인 KC산업에 기술이전을 통하여 제품판매 및 공사수주를 위한 마케팅 준비

바. 지수재 최적화를 통한 급곡구간 이음부 방수시스템 및 시공기술 개발 (건국대학교 산학협력단)

(1) 기술개요

급곡구간과 같이 누수가 많이 발생하는 구간에 적합한 지수재 설치방안을 개발을 통하여 시공오차와 세그먼트 이음부의 누수현상을 줄일 수 있다.

(2) 연구개발성과 수요기업 및 현장적용 기관/업체

연구개발성과 수요처 : 국내·외 터널 설계 및 시공사

(3) 성과 활용을 위한 활동

(가) 연구과제를 통하여 ‘세그먼트에 설치하는 일면 설치기술’에 관한 기술이전을 체결한 기업과 해당기술 적극 활용

(나) 누수가 많이 발생하는 급곡구간에 일면 지수재의 설치 및 재질선택에 대한 가이드라인을 제시하여 세그먼트 이음부의 누수와 시공오차 감소

사. 워터젯을 이용한 급곡구간 여굴생성 기술개발 (부산대학교 산학협력단)

(1) 기술개요

R30m급 급곡구간 시공기술 개발을 위해서는 급곡구간에서 쉘드TBM의 원활한 이동을 위하여 주변지반에 추가적인 여굴생성 기술이 필요하다. 그러나 기존의 카피커터(copy cutter)를 이용한 여굴생성 기술은 지반이 단단한 곳(암반지역)에서 활용이 불가능 하다. 암반지역에서 R30m급 급곡구간 시공기술 개발을 위해서는 새로운 여굴생성 기술이 필요하다. 워터젯 암반 절삭기술은 암반 급곡구간에서 추가적인 여굴시공을 위해서 효율적인 방법이 될 것이다. 급곡구간에서 예상치 못한 암반(연암~경암범위, 최대 일축압축강도 200MPa)에 대하여 효율적인 여굴생성 가능하다.

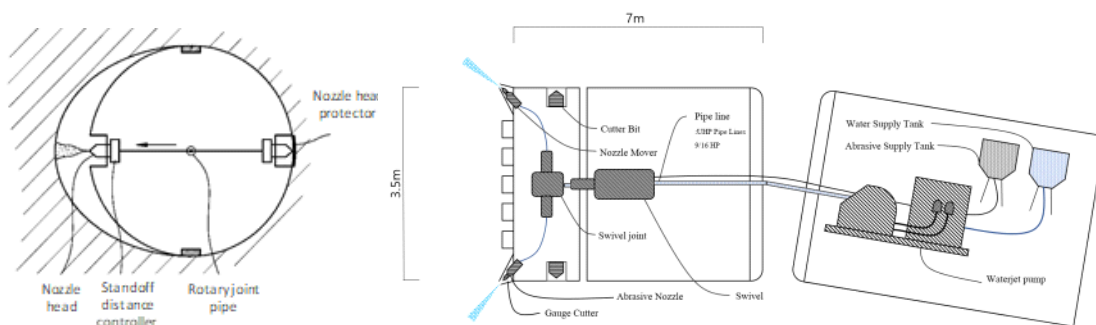
(2) 연구개발성과 수요기업 및 현장적용 기관/업체

(가) 연구개발성과 수요처 : TBM 장비 제작회사

(3) 성과 활용을 위한 활동

(가) TBM 급속구간 설계 반영

(나) TBM제작회사와의 MOU 및 특허 활용



<그림 5.2.4> 워터젯 여굴생성 기술 개념도

아. 특수지반 분류 및 쉴드 TBM 효율적 통과기법 개발 (서울대학교 산학협력단)

(1) 기술개요

도심지 공동구의 건설을 위해 적용되는 TBM공법은 다양한 형태의 특수지반에서 굴진율이 저하되고 다운타임이 증가하는 시공상의 문제가 빈번하게 발생함. 현재 국내에서는 특수지반에 대한 분류기준이 미흡하고 이러한 특수지반에 효과적으로 대처하기 위한 시공 매뉴얼이 없는 상황으로, 본 연구에서는 도심지 소단면 터널식 공동구의 효율적인 건설을 위한 특수지반 분류기법 및 쉴드 TBM의 급속시공 매뉴얼의 개발하였음.

(2) 연구개발성과 수요기업 및 현장적용 기관/업체

연구개발성과 수요처 : 공동구는 국가기간시설 중 하나이므로 공동구의 활용·관리 주체인 공공사업기관 또는 지자체, 그리고 시공주체는 토목건설회사 및 설계회사가 수요처가 될 것임. 뿐만 아니라 중·대단면 터널시공에도 적용가능한 기술이므로 철도, 도로 등과 관련된 공공기업, 지자체 또한 잠재적인 수요처로 파악됨.

(3) 성과 활용을 위한 활동

(가) 국내 설계/시공 예정 중인 쉴드TBM 현장에 대한 기술자문 및 설계 검토 수행 예정
(예상현장: GTX-A, 김포-파주)

자. 특수지반 최적보강 설계기준 및 시방서 제안 (㈜수성엔지니어링)

(1) 기술개요

국내·외 소단면 공동구 설계 및 시공 관련 기술은 선진국에 비해 상당히 낮은 수준 (10~70%)에 머물러 있다. 특히, 호박돌층, 복합지반 등의 특수지반 조건에서는 굴진 속도의 저하, 배토량 관리의 어려움, 동공 발생, 지반 침하로 인한 도로 붕괴 등 다양한 시공문제가 발생하고 있으나 이러한 특수지반 조건에서의 시공 기술이 매우 부족하다. 특히 소단면 공동구의 경우 단면규모가 작아 대응용 부대시설 미확보로 시공효율성이 급감하고 있다. 이를 해결하기 위해 쉼드 TBM 공사가 특수지반/특수조건에서 진행될 시, 효율적으로 통과하기 위한 공법, 굴착기술, 시공관리시스템의 개발이 요구되는 실정이다.

(2) 연구개발성과 수요기업 및 현장적용 기관/업체

(가) 연구개발성과 수요처 : 관련 공사에 참고자료로 해당 설계매뉴얼을 적용해 기술적용이 가능할 것으로 사료됨.

(3) 성과 활용을 위한 활동

(가) 기 시공된 현장자료와 설계매뉴얼과의 비교검토를 통한 기술검증·보완 수행

(나) 관련 공사 설계 참고자료로 반영

차. 특수지반 쉼드 TBM 최적운용조건 및 장비산정 기법 개발 (주)동아지질

(1) 기술개요

쉼드TBM을 현장에 운영 할 경우 당초 설계 검토와 다른 특수지반의 갑작스런 조우로 인하여 발생되고 있는 지반침하, 구조물 변화, 장비 문제 등의 Downtime 발생 요소들을 연구개발 검토된 최적 운용 제안서와 장비 선정 가이드를 통해 현장에 적용함으로써 최적의 장비 선정과 문제 발생시 최적의 대응 방안을 위한 보강 방법을 선정하여 공기지연을 최소화시키고 최소한의 공사비로 문제를 해결 할 수 있도록 활용한다.

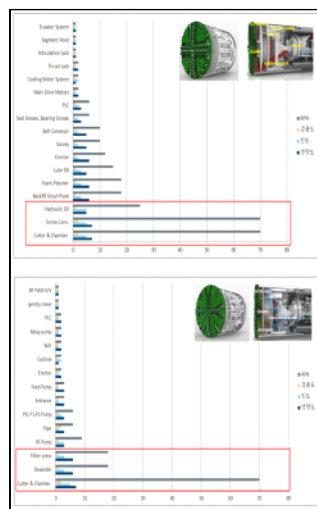
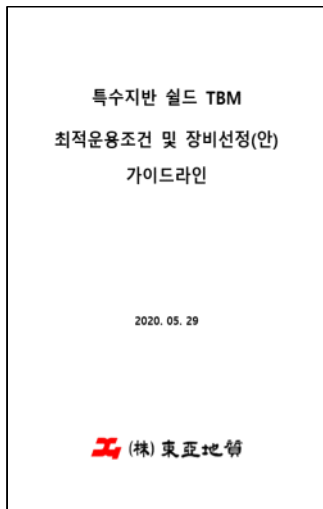
(2) 연구개발성과 수요기업 및 현장적용 기관/업체

연구개발성과 수요처 : TBM 부대품 제작 업체 및 시공전문업체

(3) 성과 활용을 위한 활동

(가) 쉼드TBM 현장 적용을 통한 기술검증·보완 수행

(나) 실용화를 위한 제품개발 특허등록 및 TBM부대품 제작시 기술조건 반영



(a) 특수지반 쉴드TBM 최적운용조건 및 장비선정 가이드라인

(b) 특허등록결정서 (TBM용 프로브드릴 어셈블리)

<그림 5.2.5> 특수지반 쉴드TBM 기법 개발 관련 가이드라인 및 특허등록 결정서

카. 특수지반용 고성능 디스크커터 개발 (㈜진성티이씨)

(1) 기술개요

특수지반에 적합한 커터링의 신소재를 연구 개발하고, 적절한 내부 설계(플로팅 쉴 및 베어링) 구현

(2) 연구개발성과 수요기업 및 현장적용 기관/업체

연구개발성과 수요처 : TBM 시공회사(동아지질, 아주지오텍, 강릉건설, 특수 건설 등), TBM 토목/건설회사(현대건설, SK건설, 대우 건설 등)

(3) 성과 활용을 위한 활동

(가) 시험실에서 미니 커터 제작하여 LAB 시험 검증 완료, 실대형 시험 검증 및 보완 예정

타. 소단면 터널식 공동구 시공기술에 의한 소단면 터널식 공동구 성능 검증 시설 개발 (한국과학기술원)

(1) 기술개요

직경 3.5m급 소단면 TBM에 대하여 최대 허용 추력 8000kN을 가할 수 있으며 3m 굴진 가능한 지상 굴진 시험 장비 설치, 깊이 10m 굴진가능길이 15m의 지반하중의 추가 2bar의 하중을 견딜 수 있도록 설계된 지하토조 시공

(2) 연구개발성과 수요기업 및 현장적용 기관/업체

연구개발성과 수요처 : 한국전력공사 전력연구원, 한국전력공사, 이엠코리아, TBM 기술개

발 기관 및 기업, TBM을 이용한 시공업체

(3) 성과 활용을 위한 활동

(가) 장비특허등록 : 소단면 TBM 선단부의 굴진 시험 장비

(나) 기술이전 : 소단면 TBM 선단부의 굴진 시험 장비 기술이전, 기술이전업체: (주)다올산업

(다) 산학과의 사용 계약을 통한 홍보 : 한국전력공사 전력연구원 및 이엠코리아에서 계약을 통해 본 시설을 사용

(라) 미디어 매체 및 기사를 통한 홍보



<그림 5.2.6> YTN뉴스 소단면 TBM 실험형 성능검증 장비 영상사진

3. 공동구용 수직구 급속시공을 위한 저소음/무진동 시공시스템, 보강/차수 기술 개발

<표 5.3.1> 3세부 기관별 핵심 연구성과 및 핵심기술의 활용방안

과제명 (세부과제명)	해당기관명	핵심연구 성과물	요소기술	수요처	활용방안
3세부: 공동구용 수직구 하향식 라이닝 현장타설 급속(1m/day 이상) 시공기술 및 장비개발	한국과학기술원	공동구용 수직구 저소음/무진동 급속굴착(1m/d ay 이상) 시공기술 및 장비 개발	3-가. 지반 변위와 지하수 유출을 방지하는 수직구 외주면 급속굴착(1m/d ay) 기술 개발	서울시, 한국전력공 사, LH공사	서울시(종 로구청), 한국전력공 사(중부건 설치, 경인건설처), LH공사('18 현재도시재 생 뉴딜 시범사업지) 현장
			3-나. 지반 변위와 지하수 유출을 방지하는 수직구 외주면 급속굴착(1m/d ay) 장비 개발	서울시, 한국전력공 사, LH공사	서울시(종 로구청), 한국전력공 사(중부건 설치, 경인건설처), LH공사('18 현재도시재

과제명 (세부과제명)	해당기관명	핵심연구 성과물	요소기술	수요처	활용방안
					생 뉴딜 시범사업지) 현장
	(주)제영이앤씨		3-다. 저소음/무진동 암반지반 급속굴착 (1m/day 이상) 장비 및 기술개발	- 서울시, 한국전력공사, 도로공사, LH공사, 철도시설관리공단, 건설회사, (주)제영이앤씨 (자체 기술실시)	연구개발성과 기술이전, 공공/민간 공사 설계 반영, 공공/민간 발주(수직 구/도심지, 현장)공사 수행,교통터 널/광산터 널/저장시 설건설현장
	(주)네오시티	공동구용 수직구 하향식 라이닝 현타 급속(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발	3-라. 공동구용 수직구 하향식 라이닝 현장타설 급속(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발	한국전력공사, 도로공사, 철도시설관리공단, 건설회사	한국전력공사(경인건설 설치외), SK건설 용인반도체 공장 연결 전력구 수직구 현장
	(주)세니즈코퍼레이션	공동구용 수직구 접속부 보강/차수장치(심도 20m 이상) 및 바이오 폴리머 차수공법 개발	3-마. 공동구용 수직구 접속부 보강/차수장치 개발	한국전력공사, 도로공사, 철도시설관리공단, 건설회사	서울시(종로구청), 한국전력공사(중부건설 설치, 경인건설처), LH공사('18 현재도시재생 뉴딜 시범사업지) 현장, 민간건설현 장(부지조성, 단지조성 등의 지중 구조물 접속부)
	한국과학기술원		3-바. 수직구 보강/차수를 위한 바이오 폴리머 차수공법 개발	해당없음	해당없음

가. 지반 변위와 지하수 유출을 방지하는 수직구 외주면 급속굴착 (1m/day) 기술 및 장비 개발 (한국과학기술원)

(1) 기술개요

기존 수직구 굴착시 지반 변위와 지하수 유출을 방지하기 위해 시공되었던 가시설물을 배제하면서 동시에 지반 안정을 확보할 수 있는 공동구용 수직구 굴착공법 개발

(2) 연구개발성과 수요기업 및 현장적용 기관/업체

연구개발성과 수요처 : 서울시, 한국전력공사, LH공사

(3) 성과 활용을 위한 활동

(가) 서울시(종로구청), 한국전력공사(중부건설처, 경인건설처), LH공사('18 현재도시재생 뉴딜 시범사업지) 등 현장 적용 가능

나. 지반 변위와 지하수 유출을 방지하는 수직구 외주면 급속굴착 (1m/day) 장비 개발 (주에이치비씨)

(1) 기술개요

기존 수직구 굴착시 지반 변위와 지하수 유출을 방지하기 위해 시공되었던 가시설물을 배제하면서 동시에 지반 안정을 확보할 수 있는 공동구용 수직구 굴착공법 개발

(2) 연구개발성과 수요기업 및 현장적용 기관/업체

연구개발성과 수요처 : 연구개발성과 수요처 : 본 연구 개발 기술은 공동구의 수직구 건설 발주 기관인 한국전력공사, LH한국토지주택공사 및 터널 건설 발주 기관인 도로공사, 철도시설공단 등과 기타 민간시설 발주기관에서 수요가 있을 것으로 기대되며 수직구외 지하저장시설, 도심지 건축물의 지하 기초굴착, 석산 및 광산 채굴, 건축 토목 구조물 해체공사 등에 적용 가능성이 높다.

(3) 성과 활용을 위한 활동

(가) 서울시(종로구청), 한국전력공사(중부건설처, 경인건설처), LH공사('18 현재도시재생 뉴딜 시범사업지) 등 현장 적용 가능

다. 저소음/무진동 암반지반 급속굴착(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발 (주제영이엔씨)

(1) 기술개요

수직구 내부 암반지반을 급속으로 굴착하는 장비 및 기술 (워터젯등을 활용하여 암반 굴착을 위한 천공, 절삭, 할암, 버력 상차를 일체화된 장비로 수행).

(2) 연구개발성과 수요기업 및 현장적용 기관/업체

연구개발성과 수요처 : 연구개발성과 수요처 : 본 연구 개발 기술은 공동구의 수직구 건설 발주 기관인 한국전력공사, LH한국토지주택공사 및 터널 건설 발주 기관인 도로공사, 철도 시설공단 등과 기타 민간시설 발주기관에서 수요가 있을 것으로 기대됨.

(3) 성과 활용을 위한 활동

단계	단계명	주요 활동내용			
		주체*	성과물**/개수	시기	내용
I	기술 개발 단계	-	-	R&D종료시점	R&D 기간 내 완료
II	기술 검증·보완 단계	(주)제영이앤씨	현장시험/2회	~종료후 3년	굴착현장에 시험적용
III	실용화 추진 단계	(주)제영이앤씨	기술실시계약/1회	~종료후 4년	연구개발성과 기술이전 공공/민간공사 입찰 추진
IV	시장 수용 단계	(주)제영이앤씨	현장적용 1회	~종료후 5년	공공/민간발주공사 (수직구/도심지,현장)

다. 공동구용 수직구 하향식 라이닝 현타 급속(1m/day 이상) 시공기술 및 장비 개발 (주)네오시티)

(1) 기술개요

공동구, 수직구 등의 분야에 적용 가능한 기술로써 하향식 유압장치로 구조물(현타 라이닝 및 PC 세그먼트)의 하강을 진행함과 동시에 굴착을 병행하여 시공하므로 기존기술 대비 공사 기간을 대폭 단축할 수 있으며, 이로 인해 공사비 절감이 가능한 공법이다.

(2) 연구개발성과 수요기업 및 현장적용 기관/업체

연구개발성과 수요처 : 한국전력공사, 도로공사, 철도시설관리공단, 대림, SK, 대우, 현대 건설, 두산건설 등 다양한 건설회사 수직구 현장 적용가능. 하향식 공법 사업화 진행으로 인천지역 전기공급 시설 전력구 공사 동송도~서송도 2개소 수직구 현장에 제안서를 5월경 제출했으며, 추가 타 공구 진행예정중

(3) 성과 활용을 위한 활동

단계	단계명	주요 활동내용			
		주체*	성과물**/개수	시기	내용
I	기술 개발 단계	-	-	R&D종료시점	R&D 기간 내 완료
II	기술 검증·보완 단계	월드PC 및 설계회사	현장시험/1회	~종료후 2년	네오시티 수직구 현장에 시험적용
III	실용화 추진 단계	한국전력공사	사업화·제품화/1개	~종료후 3년	네오시티 연구개발성과 직접 입찰 추진
IV	시장 수용 단계	한국전력공사	현장적용 2회	~종료후 5년	A-한국전력공사 (경인건설처현장) B-한국전력공사 (중부사업처현장)

라. 공동구용 수직구 접속부 보강/차수 장치 개발 (㈜세니츠코퍼레이션)

(1) 기술개요

지하수위 저하로 인한 지반 침하, 지진 등 동하중 작용 시 접속부의 기하학적 특성에 따른 접속부 손상 등 기존 수직구 접속부의 한계를 보완할 수 있는 접속부 보강/차수 장치

(가) 접속부 보강/차수 장치 성능 : 수용변위 $\pm 50\text{mm}$, 차수율 100%

(나) 접속부 보강/차수 장치 구성 : 홀더링(탄성체, 스프링 이탈 방지), 탄성체(변위 대응 및 차수), 수직 및 수평방향 스프링(변위 수용 및 탄성체 압착)

(2) 연구개발성과 수요기업 및 현장적용 기관/업체

연구개발성과 수요처 : 공공기관, 민간건설업체

(3) 성과 활용을 위한 활동

(가) 2020년 4월 자체 기술실시계약 완료

(나) 공동구, 전력구, 터널 수직구 접속부, 관로 접속부 등 접속부 보강/차수 장치의 응용 가능한 민간건설현장 적용 예정

단계	단계명	주요 활동내용			
		주체*	성과물**/개수	시기	내용
I	기술 개발 단계	-	-	R&D종료시점	R&D 기간 내 완료
II	기술 검증·보완 단계	(주)세니츠 코퍼레이션	현장시험/1회	~종료후 2년	민간건설현장(부지조성, 단지조성 등의 지중 구조물 접속부)에 시험적용
III	실용화 추진 단계	(주)세니츠 코퍼레이션	사업화·제품화/1개	~종료후 3년	공공/민간 발주공사 입찰 추진
IV	시장 수용 단계	(주)세니츠 코퍼레이션	현장적용 2회	~종료후 5년	공공/민간 발주공사 (수직구 접속부, 지중 구조물 접속부 현장)

바. 공동구용 수직구 접속부 보강/차수 장치 개발 (UNSW)

(1) 기술개요

비시멘트 계열 재료로 식용이 가능한 바이오 폴리머를 기반으로 초기 급속 고결 성능이 우수하고 높은 토·수압 조건에서 우수한 차수 성능(투수계수 10^{-8} m/s 이하)을 발휘하는 친환경 차수재

(2) 연구개발성과 수요기업 및 현장적용 기관/업체

뛰어난 차수성능을 바탕으로 수리환경 지반 구조물 (댐, 제방 등)에 차수 및 내침식성 방지 재료로 응용이 가능함.

(3) 성과 활용을 위한 활동

(가) 바이오폴리머 차수재 시제품 제작 및 차수재 투수성 공인 시험 성적 획득

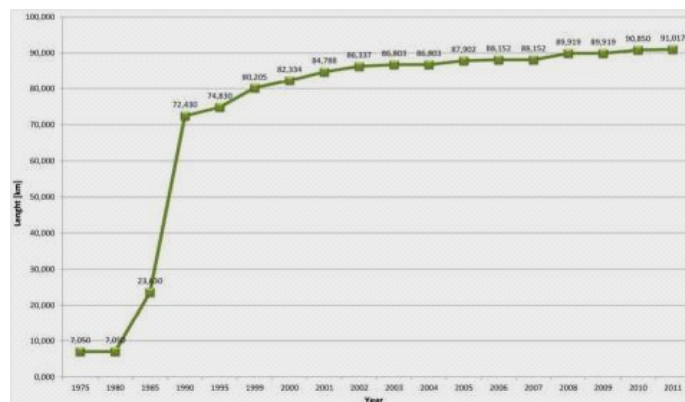
제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

1. 도심지 터널식 공동구 최적 설계용량산정 및 글로벌 표준화 설계기술 개발

가. 도심지 유형별 공동구 설치 타당성 평가 시스템 개발

(1) 프라하의 공동구 개요

체코 프라하시는 1980년대 초반 7km 가량에 불과하던 도심 공동구를 1990년대 초반까지 72km 까지 건설하였고 현재 91km 가량의 도심지 공동구가 운영 중이다. 1980~90년대 약 10년 동안 도심지 공동구를 건설하기 위해서 중앙정부의 재정을 집중적으로 투입하였다.



<그림 6.1.1> 프라하시의 도심지 공동구 건설 이력

<표 6.1.1> 프라하 도심 공동구 형식별 설치 현황

구 분		터널 공동구	개착 공동구	연결 공동구(Passages)
합 계	91.0 km	18 km	63 km	10.0 km
중부 지역	18.4 km	18 km	-	0.4 km
서부 지역	33.2 km	-	28 km	5.2 km
동부 지역	39.4 km	-	35 km	4.4 km

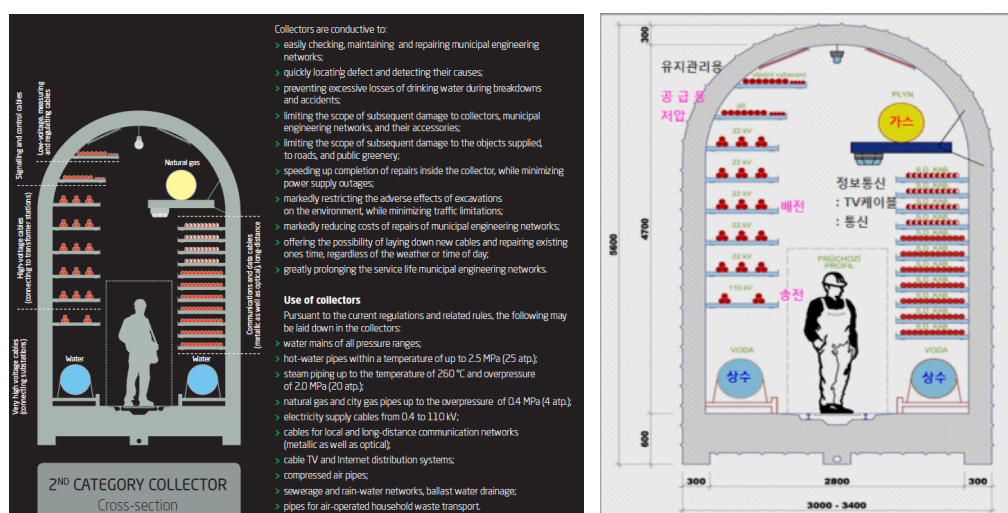


프라하시는 지방자치 조례에 의해서 공동구가 설치된 도로의 Life-Line은 모두 공동구가 수용하도록 계획하여 운영관리 하고 있다. 또한 공동구의 모든 건설비용은 시청에서 부담하고, 점용기관은 해당 시설 설치비만 부담하므로 인구 125만의 도시로서는 가장 큰 규모의 공동구를 가지게 되었으며 세계적으로 공동구를 관광상품화한 유일한 지역일 것으로 판단된다. 공동구의 건설비용을 모두 시청에서 부담하므로 점용기관들과 이해관계가 충돌하지 않고 협조적이며 통합관리에 의해서 유지관리비용의 절감 효과가 크다.

역사적인 고건축물과 문화거리가 많아서 관광의 중심지역인 프라하의 중부지역은 터널식 공동구로 18.4km 설치되었으며 도심 외곽과 신도시 개발지역인 서부와 동부지역이 33.2 km, 39.4 km로 모두 개착식으로 건설되었다. 문화유적이 많은 구도심은 터널공법(지하 심도 30~45m)을 적용함으로써 유적지의 훼손과 관광객을 위한 교통 혼잡을 최소화하였다. 또한 유럽의 유명 관광지인 프라하는 공동구 출입문과 환기탑 등이 효율적이고 간결하게 디자인되어 국내에서와 같은 주민 민원요소로서의 작용을 최소화했다.

(2) 프라하 공동구의 설계용량 최적화 사례

다음 그림은 프라하 공동구의 수용시설별 요구 조건을 설명하고 있는 그림으로서 프라하시의 공동구 관리기관의 홍보자료를 차용한 것이다. 국내에서 수용하고 있지 않은 가스관, 하수도, 탈취용 공기배관, 쓰레기 수송관 등의 요구조건이 비교적 알기 쉽게 나타내고 있다. 즉 공동구로 수용하기 위한 기본적인 요구사항을 제시함으로써 단면최적화, 수용량 최적화에 따른 궁극적인 설계용량 최적화를 이루고 있다. 가스, 냉난방관과 같은 압력배관의 경우에는 온도 및 유송압력에 대한 제한을 제시함으로써 대형관로의 수용을 지양하고 있음을 알 수 있으며 전기는 공급 말단의 저압전력으로부터 송전선로까지 동일 단면에서 수용하고 있다.



<그림 6.1.2> 프라하 도심 공동구의 수용시설 요구 제한

프라하시는 1975년부터 가스관과 전력(심지어 송전까지 동일 공간에서 수용), 통신을 공동 수용함으로써 발생하는 문제점을 각종 제어검측 장비와 유무선 정보시스템의 구축으로 큰 무리 없이 잘 관리하고 있으며 이로 인한 설계용량 최적화로 도심지 공동구의 경제성을 극대화 시켜 공동구 활성화에 크게 기여하고 있다. 그러나 국내 공동구의 내부 수용시설은 지나치게 내부 단면이용 효율이 비경제적이므로 프라하 공동구에 비해 대단면이 요구되고 있다. 프라하 및 대부분의 유럽 국가에서는 전력(송전, 배전, 공급용 저압 등)과 통신, 가스배관 등을 동일 공간에서 공동 수용하고 있으며, 일본의 경우에도 가스관을 분리한 별도실 개념으로 적용하고 있다. 특히, 국내 공동구에서는 가스 폭발을 염려해서 가스관을 모두 수용하지 못하고 있다.



<대형관 단면최적화 사례>



<상수도 및 전력/통신 단면최적화 사례>

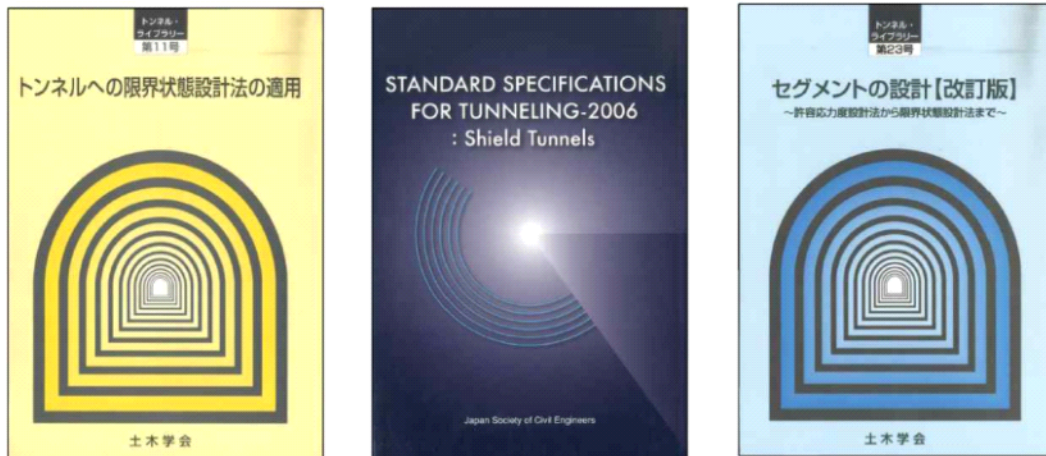
<그림 6.1.3> 프라하 도심 공동구의 수용시설 배치 현황사진

나. 국외 구조물 한계상태설계법 설계기준 조사

(1) 일본

일본은 별도의 설계기준 없이 표준시방서 내에 설계편과 시공편으로 분리되어 있으며 해설편에 상세한 기술적 내용이 설명되어 있다. 일본토목학회는 1964년 3월 산악터널을 중심으로 하는 표준시방서를 제정한 이후 1965년 9월 실드공법 소위원회를 발족하여 실드터널에 대한 조사연구를 시작해 1970년에 「실드공법 지침」을 제정하고 7년 후인 1977년에 「터널 표준시방서(실드편)·동해설」을 제정하였다.

최근 2006년에 터널표준시방서를 3차로 개정하였으며 「터널표준시방서·동해설(산악공법)」, 「터널표준시방서·동해설(실드공법)」, 「터널표준시방서·동해설(개착공법)」 등 총3편으로 구성하였다. 1996년 개정 이후 10년간 개발된 신기술을 반영함과 동시에 유지관리 중요성의 고조 등 사회정세의 변화도 반영하였고, 특히 한신(kobe) 대지진의 사례를 통해 내진설계법에 대한 내용을 반영하였으며, 설계의 합리화 수법 및 유지관리에 관계되는 사항 등을 보완하여 개정하였다



<그림 6.1.4> 일본 터널의 한계상태 설계 코드

(2) 미국

미국에서는 연방도로청, 각 주별 교통성 등의 관련 부서에서 각종 다양한 기준을 체계화하여 작성·관리하고 있으며, 성능중심의 터널설계기준을 제정하여 반영하고 있는 추세이다. 대표적으로 연방 교통청(U.S. Department of Transportation)에서는 “Design Recommendation for Concrete Linings”를 제시하고 있고, 보다 구체적으로는 연방도로청(Federal Highway Administration, FHWA)에서 기준 및 지침 등을 제시하고 있다.

2005년에 제정된 FHWA, Road Tunnel Design Guidelines(Publication No. FHWA-IF-05-023)에서는 터널의 계획, 조사, 설계(연약지반 터널, 암반터널, 복합지반 터널, 수직구, 침매터널 등), 복개터널, 내진설계, 안전, 화재대책, 조명, 환기, 시공, TBM(Tunnel Boring Machine)등의 내용을 폭 넓게 다루고 있다. 그 외에 미국공병단(U.S. Army Corps of Engineering)에서 1997년 5월에 「Engineering and Design - Tunnels and Shafts in Rock」을 제정하였으며 암반터널의 설계·시공에 대한 내용이 비교적 상세하게 기술되어 있다.

미국의 NFPA(National Fire Protection Association)에서는 「도로터널, 교량 및 기타 접근이 제한된 구조의 고속도로 방재표준(NFPA 502 : Standard for Road Tunnels, Bridges and Other Limited-Aces Highways)」을 제정하여 방재시설 설치기준으로 활용하고 있다. 본 기준은 최근 2011년 개정되었으며 고속도로, 도로터널, 교량, 고가도로, 공중 권을 가진 구조물에 대한 방재시설 기준을 확립하였다. 개정된 기준에서는 터널에 있어서 성능기반의 설계(PBD, Performance-based design)를 더욱 확장하였고, 터널의 연장에 상관없이 모든 터널의 화재와 안전 시스템에 있어서 공학적 분석을 더욱 요구하도록 규정하였다. 또한 새로운 챕터(Chapter)에서는 미분무수 소화시스템(Fixed Fire-Fighting Systems, FFS)에 대한 기술이 추가되었고, 시스템의 위탁 가이드라인과 주기적인 테스트에 대한 요구항목이 추가되었다. 미국 연방도로청의 터널관련도서는 기준, 지침, 편람들이 있으며 아래의 표와 같이 발행되어 왔다.

<표 6.1.2> 미국의 터널설계기준

분류	기준, 지침, 편람 등	발행 연도
Tunnelling	Drilling and Preparation of Reusable, Long Range, Horizontal Bore Holes in Rock and in Gouge	1975
	Cut-and-cover Tunneling, Volume 1	1976
	Aerial Remote Sensing Techniques for Defining Critical Geologic Features Pertinent to Tunnel Location & Design	1976
	Earthquake Engineering of Large Underground Structures	1980
	Highway and Rail Transit Tunnel Inspection Manual and the Maintenance and Rehabilitation Manual	2002
	Highway and Rail Transit Tunnel Inspection Manual	2005
	Highway & Rail Transit Tunnel Maintenance & Rehabilitation Manual	2005
	FHWA Road Tunnel Design Guidelines	2005
	Underground Transportation Systems in Europe: Safety, Operations, and Emergency Response - June 2006	2006
	FHWA Road Tunnel Design Manual	2008

(3) 영국

<표 6.1.3> 영국의 터널설계기준

장	주요 내용
General requirements	References to Standards European standards and Eurocodes
Materials	Standards Concrete, reinforcement, precast concrete lining, Spheroidal graphite cast iron lining, steel tunnel lining Jacking pipes, support arches(lattice arches), spiles, dowels, rockbolts, sprayed concrete constituent materials, waterproof membrane, Gaskets, Cement grout for cavity grouting, packings, grommets and bolts
Methods	Excavation for tunnels Drilling, Explosives Timbering Spiling, dowelling / rockbolting Sprayed concrete Forepoling Groundwater Probing ahead Break-outs from Shafts and tunnels Tunnel boring machines(TBM) and shields Pipe jacking, grouting In-situ concrete linings other than sprayed concrete
Ground stabilization	Compressed air, ground freezing, dewatering, compensation grouting
Working environment	Electrical installations Ventilation during construction Lighting Noise and vibration Disposal of spoil and water Leakage and infiltration
Renovation and repair	Repair of brickwork tunnels

영국 BTS(The British Tunneling Society)와 ICE(The Institution of Civil Engineers)가 공동으로 「Specification for tunneling」을 2000년도에 제정하였고, 2010년 3rd Edition이 개정·출간 되었으며, 이는 우리나라의 설계기준 및 표준시방서에 준하는 위상을 가진다. 「Specification for tunneling」은 일본의 터널표준시방서와 마찬가지로 기존의 기준에 대한 의견, 비판, 제안 등을 반영하여 주요 내용들을 개정하였고, 2004년에 추가로 BTS와 ICE가 공동으로 「Tunnel Lining Design Guide」를 제정하였다. 이 가이드는 NATM터널의 현장 타설 콘크리트 라이닝과 슛크리트 라이닝뿐만 아니라 실드터널의 세그먼트 라이닝 등 다양한 라이닝의 해석방법, 설계수명, 내구성, 품질관리 등을 상세히 다루고 있으며 영국에서의 주요 적용사례들을 함께 수록하였고, 이외에도 지표침하, 계측 및 유지관리에 대해서도 관련 가이드를 제시하고 있다.

(4) 유럽

EC(European Community)의 5차 framework 프로그램의 일환인 FIT(Fire In Tunnels) 프로젝트는 독일 STUVA의 Prof. Hack의 주도로 수행되었으며, 몽블랑터널 화재, 고타드터널 화재 등 그간 빈번하게 발생한 터널화재에 대한 안전성을 확보하는데 목적을 두었다. 연구 프로젝트 결과물로 설계 자료와 설계지침 등을 아래와 같이 제시하였다.

<표 6.1.4> FIT 프로젝트의 설계자료와 설계지침

보고서	내용
Technical Report - Part I	Design Fire Scenarios
Technical Report - Part II	Fire Safe Design - Road Tunnels Fire Safe Design - Rail Tunnels Fire Safe Design - Metro Tunnels
Technical Report - Part III	Fire Safe Design

그 외의 슛크리트 등 터널 시공재료와 관련된 기준들은 주로 유럽의 EFNARC (European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems)에서 제시하고 있는 기준, 가이드라인, 시방 등을 따르고 있다. 현재 EFNARC는 세계 굴지의 토목·건축용 재료회사 들이 주도하고 있으며, 특히 슛크리트 부분에 있어서는 세계 표준과 같이 고려되고 있는 실정이다.

<표 6.1.5> 유럽 EFNARC의 터널설계기준

연도	자료명
1996	European Specification for Sprayed Concrete
1999	Guidelines to the Sprayed Concrete Specification
1999	Execution of Spraying (revision of Section 8 of the European Specification for Sprayed Concrete)
2002	European Specification for Sprayed Concrete: Checklist for Specifiers and Contractors
2005	Specification and Guidelines for the use of specialist products for Mechanized Tunnelling (TBM)
2006	Guidelines for testing fire protection systems for tunnels (draft)

(5) 기타 주요 선진국

CEN(유럽표준기구), BSI(영국표준기구), CSI(미국시방서협회) 등에서는 표준화된 코드체계를 활용하여 기준을 관리하고 있으며, 특히 미국의 경우 CSI의 Masterformat이라는 표준화된 번호 및 분류체계를 사용하여 시방서 정보를 관리하고, 설계도면 노트 및 cost 데이터와의 연계 등 공사 관리를 위한 기반을 제공하고 있다. 기타 제·개정 작업의 추진에 있어서는 ISO, Eurocode, BS Code 등의 기준정비기구에서 매뉴얼에 따라 정비토록 규정하고 있다. 일본, 미국, 영국, EU 등 선진국의 기술기준 제·개정과 관련하여 관리주체 및 협력체계 현황을 살펴보면, 학·협회 등 민간부문에서 기술기준과 관련하여 다양한 학술적 성과물을 발간하고, 정부에서 기술기준을 포괄적으로 통합하여 원칙적으로 갖춰야할 성능을 규정하며, 발주청에서 해당 사업의 현장여건에 적합한 실시기준을 작성하여 사업을 실시하여 정부 및 발주청, 학·협회가 상호 협력하여 상·하위 기술기준을 체계적이고 종합적으로 정비할 수 있도록 하고 있다.

다. 국내외 쉘드 터널에 적용되는 하중 종류 및 항목

하중분포함수 추정을 위한 통계특성치 분석을 위해 아래와 같이 국내외 쉘드 터널에 적용되는 하중종류 및 항목 조사 검토하였다 이를 위해 국내(한국터널학회), 일본(JSCE), 미국(FHWA), 유럽(Eurocode) 등을 검토하였다.

<표 6.1.6> 국내외 쉘드 터널에 적용되는 하중종류 및 항목 조사

하중종류		항목	비고
일반하중	주하중	토압(이완하중)	한국터널공학회(2008), 세그먼트 작용하중
		수압	
		자중	
	부하중	지진하중	
특수하중	지반침하의 영향		
		이완토압	JSCE Geo-code21(2004)
		전토압	
		수압	
		자중	
		상재하중	
DC : Dead Load(the self weight of the structural components, nonstructural attachments)			FHWA-NHI-10-034 December 2009 Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels Civil Elements
DW : Dead Load(the self weight of wearing surfaces and utilities)			
EV : Vertical Earth Pressure Load			
LL : Vehicular Live Load			
WA : Water Load			
일반하중	주하중	연직 및 수평 토압	日本總合技術研究所(2003) 일본철도총합기술연구소
		수압	

	부하중	자중	세그먼트 라이닝 설계시 고려하중
		활하중	
		시공시 하중	
		지진하중	
		내부하중	
특수하중		기타하중	
		병렬터널의 영향	
transient	Permanent (G)	지반침하의 영향	Eurocode (PAS 8810:2016)
		Self-weight	
		Internal water pressures	
		Shrinkage	
		Initial water and ground	
	Variable (Q)	Temporary fixings	
		Internal water pressures	
		Thermal effects	
		Grouting	
		Hydraulic rams (TBM)	
		Construction equipment	
		Testing loads	
persistent	Permanent (G)	Self-weight	
		Ground	
		Water	
		Existing imposed loads	
		Future imposed loads	
		Unloading/dewatering	
		Internal loads	
	Variable (Q)	Existing imposed loads	
		Future imposed loads	
		Internal loads	

라. 국외 목표신뢰도 지수 결정 방법 조사

(1) 기존구조물의 신뢰도수준 평가에 의한 방법

(가) AASHTO(2010) 시방서

일반 교량의 하중저항계수설계법의 목표신뢰도지수를 결정하기 위하여 미국 전역에서 선정된 200 여개 공용 중인 교량의 내하력과 각종 하중의 통계 데이터를 활용한 신뢰성해석을 실시하며, 목표신뢰도지수는 3.5(설계공용기간 75년)로 결정한다.

(나) AKulicki et al.(2007)

교량 124개소에 설치된 얇은기초에 대한 신뢰성해석을 수행하였으며, 목표신뢰도지수를 3~4로 제안하였다

(다) Huang(2010)

보강토 옹벽에 대한 신뢰성해석과 수치해석을 실시하였으며, 목표 신뢰도지수를 $T=2.33(P_f=1\%)$ 으로 결정하여 LRFD 저항계수를 보정하였다.

(2) 생애주기비용(LCC) 최소화기법에 의한 방법 : 없음

(3) 과거 사고통계에 기초한 방법

(가) Eurocode

구조물의 위험도를 고려하여 신뢰도 등급(Reliability Class, CEN, 2001)을 3단계로 구분하였다.

<표 6.1.7> 구조물 위험도를 고려한 신뢰도 등급(Reliability Class, CEN, 2001)

Reliability Class	Description	Examples of buildings and civil engineering works
RC1	Low consequences for loss of human life, social and environmental consequences small or negligible	Agricultural buildings, silos, greenhouses
RC2	Medium consequences for loss of human life, economic, social or environmental consequences considerable	Residential and office building, public buildings where consequences of failure are medium
RC3	High Consequences for loss of human life, or economic, social or environmental consequences very great	Grandstands, public buildings where consequences of failure are high

각 등급별로 1년과 50년 발생확률에 대한 신뢰도 지수를 다음과 같이 설정하였다.

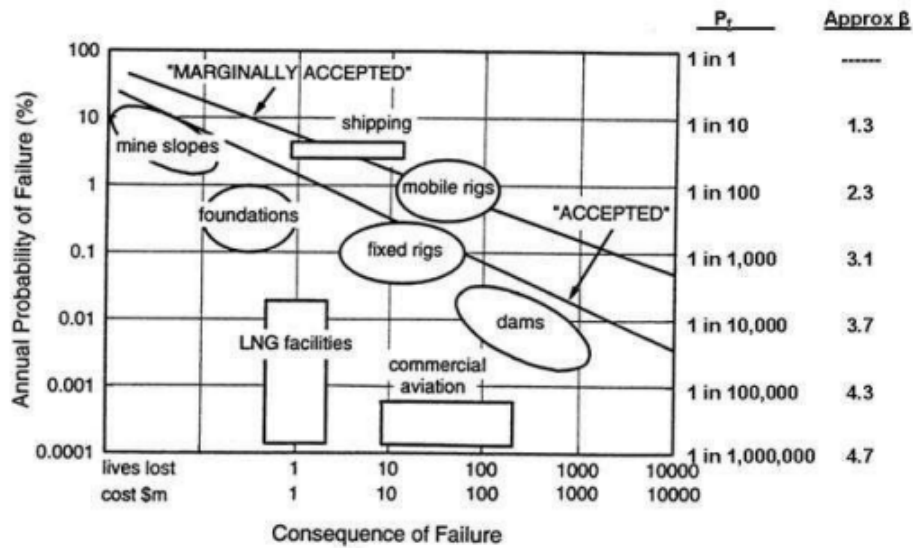
<표 6.1.8> 발생확률에 대한 신뢰도 지수

Reliability Class	1 year reference period	50 year reference period
RC1	5.2	4.3
RC2	4.7	3.8
RC3	4.2	3.3

(4) 피해 위험도 및 인적 손실에 대한 위험도를 고려한 방법

(가) Baecher and Christian(2003)의 허용파괴확률에 관한 연구

여러 종류의 구조물에 대한 인명손실, 인명손실 저감을 위해 필요한 투자비용을 파괴확률(신뢰도 지수)과의 관계로 분석하였다.



<그림 6.1.5> 투자비용과 파괴확률(신뢰도 지수)간 관계

마. 국내외 한계 상태 설계기준의 목표신뢰도 지수

국내·외 한계상태설계기준의 목표신뢰도 지수를 살펴보면 도로교설계기준 한계상태설계기준은 유로코드의 RC2, ASHTO LRFD와 CHBDC가 3.5~4.0 사이의 동일한 수준의 신뢰도 수준을 가지고 있고, 유로코드의 RC3이 4.26으로 가장 큰 신뢰도 수준을 가지고 있는 것으로 나타났다.

<표 6.1.9> 국내·외 한계상태설계기준의 목표신뢰도 지수

구분		목표신뢰도 지수
도로교설계기준(한)	KRL	3.72
AASHTO LRFD	AL	3.50
CHBDC	CHBDC	3.50
EuroCode	EUC	4.26
JCSS (Joint Committee on Structural Safety)	JCSS	3.70
Swedish Transport Administration	STA	3.72

바. 국외 한계상태설계기준 및 세그먼트라이닝 설계사례

(1) 국외 주요 설계기준

글로벌 표준화 설계법(LRFD/LCC)은 구조설계 분야에 먼저 처음 도입되었고, 지반분야에는 상대적으로 최근에 도입되기 시작하였으며, 지반분야의 경우 유럽지역에서 먼저 시작되어 Eurocode7(1994)에서 설계기준으로 채택되기 시작하였다.

WTO체제 및 국제표준화기구(ISO)를 중심으로 북미지역(LRFD)과 유럽지역(CEN)의 선진국 위주로 성능중심 설계기준을 구축하려는 움직임이 활발해지고 있으며, 이에 따라 한계상태 설계법이 적용 추세에 있다.

영국에서는 최근 SCL, 세그먼트라이닝 구조설계시 Eurocode 2를 적용하여 cross rail, thames tide tunnel, high speed 2 역시 Eurocode에 준하여 설계되었다.

EUROCODE에 대한 검토는 British Standards Institution에서 2015년도에 draft로 제시한 PAS 8810, Design of concrete segmental tunnel linings 을 대상으로 수행하였다. PAS 8810에서는 터널 라이닝에 대하여 극한한계상태(ULS)와 사용한계상태(SLS)를 대상으로 하였다. 극한한계상태(ultimate limit state)에서 고려할 사항은 구조물의 정적평형(EQU), 구조물 또는 부재의 내적파괴, 과대변형(STR), 지반의 파괴와 과대변형(GEO), 부력에 의한 구조물과 지반의 평형(UPL), 동수경사에 의한 수압에 의한 파괴, 내부부식과 파이핑(HYD)로서, 터널 라이닝 검토시에 고려할 사항은 STR, GEO, UPL이다.

$$r_{sd} \times r_f \times \varphi \times F_k \leq \frac{1}{r_{Rd}} \times \eta \times \frac{X_k}{r_m}$$

미국은 AASHTO LRFD 교량설계기준 1판(1994)에서 기초구조물 설계에 한계상태설계 개념을 적용하기 시작한 이후 2010년에는 연방정부에서 발주되는 모든 교량에 대하여 LRFD 설계를 의무화 하였고, 지속적인 연구개발을 통해 하중계수, 저항계수의 보정 및 적용 지반 구조물의 종류를 늘려가고 있고, 라이닝구조설계에만 LRFD를 따르고 있으며, 초기지보에는 LRFD를 적용하지 않고 있다.

$$\sum \eta \times r_i \times Q_i \leq \varphi R_n$$

일본의 경우 1997년부터 한계상태설계법으로 터널 적용연구를 시작하여 2001년에는 한계상태설계지침(안)을 제시하였고, Geo-code21(2004)에서부터 성능기반의 한계상태설계법을 도입하였으며, 일본 터널표준시방서(standard specifications for tunneling, shield tunnel, 2006)의 세그먼트설계에 한계상태설계법이 반영되어 있고 허용응력설계법과 비교한 해설서가 발간되었다. JSCE에서는 극한한계상태와 사용한계상태를 대상으로 하고, 각 한계상태에 따라 구조물 계수와 재료계수, 하중계수, 부재계수 등을 규정하였다.

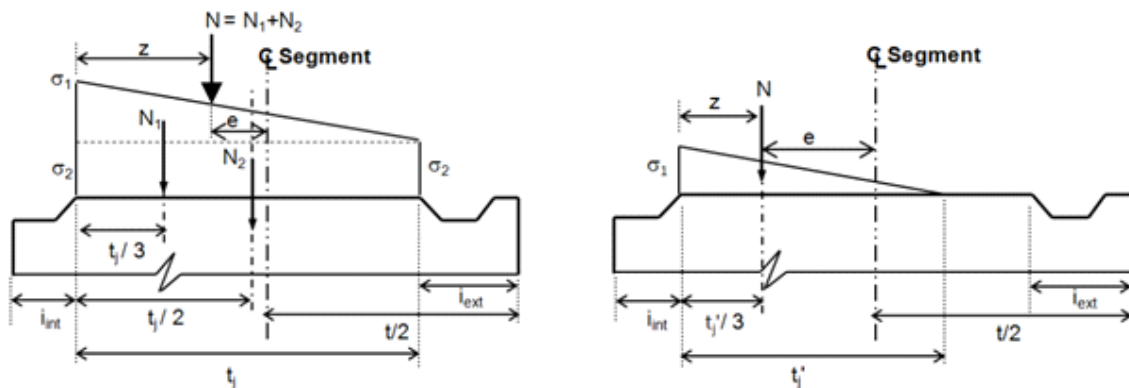
$$r_i \times r_a \times r_f \times F_n \leq \frac{f_n}{r_m \times r_b}$$

싱가폴의 경우 터널 라이닝 구조설계기준은 한계상태 설계법을 도입한 SS(Singapore Standards) CP65와 BS 5950을 기본으로 한다.

(2) 조인트버스팅 설계법

PAS 8810(2016) 및 Tunnel Lining Design Guide(ARUP, 2017)에서는, 세그먼트 조인트에 작용하는 집중된 압축응력에 의해 횡 방향 인장응력이 발생하고 이러한 인장응력의 작용으로 버스팅(bursting)이 발생하는 것으로 설명되어 있다. 또한, 버스팅(bursting)을 일으키는 조인트에서의 압축응력은 원주방향 조인트(circumferential joint)에 켜 축력을 가하는 경우와 반경방향 조인트(radial joint)에 축력이 전달되는 경우에 발생한다. 또한, 세그먼트 라이닝에 발생하는 버스팅 응력(bursting stress)은 일반 콘크리트의 인장강도 이내 이어야 하지만, 이 기준을 만족하지 못하는 경우는 별도의 보강이 필요한 것으로 되어있다.

평평(flat)한 반경방향 조인트(radial joint)의 응력분포를 산정하는 방법에는 Simplified method, Advanced method, CTRL method가 있으며, Simplified method가 설계 시 많이 활용된다. Simplified method는 접촉 영역에서의 압축력의 분포가 접촉영역으로부터의 거리에 비례하고 그 길이에 따라 감소한다고 가정하며, 조인트에서의 응력분포는 그림과 같이 삼각형으로 가정한다.

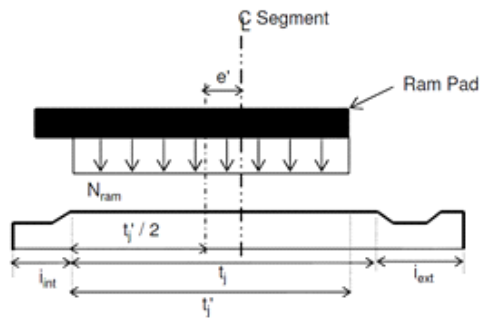


(a) Stress diagram for joint closure (b) Stress diagram for non-joint closure

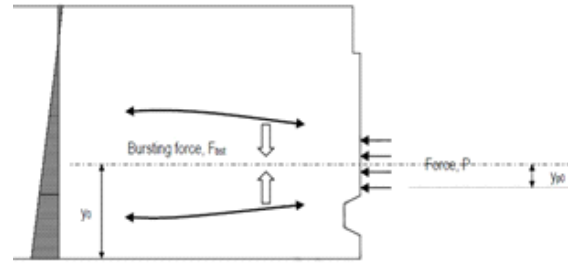
<그림 6.1.6> Stress diagram for non-joint closure

원주방향 조인트(circumferential joint)의 접촉면적은 반경방향 조인트(radial joint)와 다르게 조인트의 표면과 램의 기하학적인 형상, 세그먼트 축과 램 축 사이의 편심에 의존한다.

세그먼트 조인트의 접촉 폭이 세그먼트 두께에 비하여 감소함에 따라 램 패드에서 조인트로 전달되는 압축력은 감소된 접촉면에 집중되고, 집중된 압축응력은 세그먼트의 전체 폭에 걸쳐서 분포하므로 횡방향 인장응력은 그림과 같이 유도된다. 버스팅(bursting)에 의한 인장응력이 세그먼트 재료의 허용응력을 초과하는 경우, 초과된 인장응력에 저항하기 위해 보강재를 횡방향으로 설치한다.



(a) The distribution of ram loading and circumferential joint contact width



(b) Longitudinal distribution of bursting stress with a segment subject to ram loading

<그림 6.1.7> The stress distribution of segment joint (ARUP, 2017)

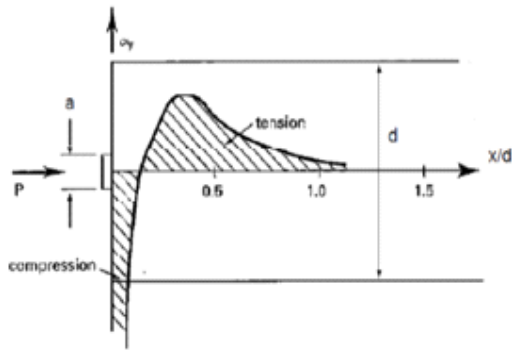
버스팅 응력(bursting stress)을 평가할 경우, 가장 보편적으로 사용되는 해석적인 방법은 Leonhardt(1964)의 이론으로서, 조인트 접촉면에 근접하여 작용하는 버스팅 응력의 분포를 추정한다. 조인트에 작용하는 접촉응력은 “축력 P / 세그먼트 두께 d ”로 계산되고, 버스팅 응력(bursting stress)은 작용하중에 수직하게 분포하는 인장응력의 탄성분포에 의하여 결정된다.

세그먼트 조인트의 작은 접촉면에 압축력이 집중되면 세그먼트 조인트에 부분적인 응력집중이 발생하고, 세그먼트 하부(x 방향)로 압축응력이 곡선궤적을 나타낸다. 이때 접촉면 근처에서는 압축응력이 발생하고 나머지 부분에서 인장응력이 발생하게 되며, 그림과 같이 a / d 의 비율이 작을수록 극한 인장응력은 크고, 접촉면에 근접하여 발생한다.

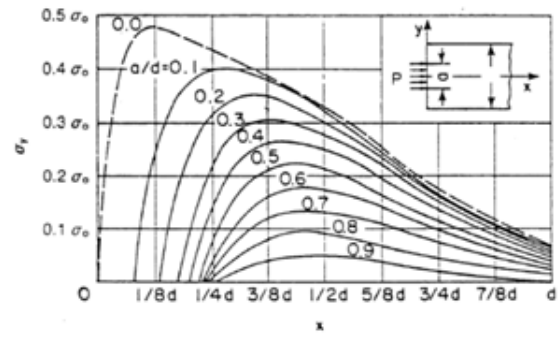
반경방향 조인트(radial joint)의 버스팅(bursting) 검토는 SLS와 ULS를 동시에 만족해야 하며, 발생하는 인장응력의 분포형상 및 Leonhardt의 방법(1964)에 의해 제안된 응력분포 그래프는 그림과 같다.

영국의 설계사례에서는 Leonhardt(1964)에 의해 제안된 응력분포를 표현한 회귀분석 식을 이용하여 반경방향 조인트(radial joint)와 원주방향 조인트(circumferential joint)에서의 극한 인장응력을 산정하고, 세그먼트 콘크리트의 설계인장강도와 비교하여 인장 보강재의 설치 여부를 결정한다.

세그먼트 조인트에 작용하는 버스팅 응력(bursting stress)의 검토 절차는, 사용한계상태(SLS)에서의 작용응력과 콘크리트 재료가 가지는 허용응력에 대한 검토를 우선 수행한 후, 허용응력을 초과하는 경우에 극한한계상태(ULS)에서의 작용응력과 철근 보강재 설치를 고려한 설계강도에 대한 검토를 수행하는 것으로 되어 있다.



(a) Transverse stress distribution



(b) Elastic distribution of transverse tensile stress for rectangular end block

<그림 6.1.8> Tensile stress distribution of segment joint (Leonhardt, 1964)

2. 도심지 터널식 공동구의 굴진율 예측 및 급곡구만/특수지반 시공기술

가. 해외 TBM 굴진율 예측모델 현황

국내의 TBM 굴진성능 예측모델로는 선형절삭시험 결과에 근거한 Chang et al. (2007)모델과 국내의 여러 현장자료와 선형절삭시험 결과에 근거하여 다중회귀분석을 적용한 Chang et al. (2011)모델이 있다. 이 모델들은 해외의 CSM모델과 NTNU모델의 장점을 살려 여러 현장의 데이터와 국내 주요 암석에 대한 절삭시험을 통하여 다양한 암석특성을 고려한 최적의 절삭조건을 제시하였고, 커터작용력, 커터 압입깊이(P_{rev}), 비에너지(SE) 등 여러 가지 값을 산정할 수 있다. 해외에서는 NTNU모델과 같이 특수한 시험(Siever's J-value test, The brittleness test, The abrasion test)을 요구하는 영향인자 대신에 실무자가 터널 현장의 예비단계에서 쉽게 획득할 수 있는 영향인자를 입력인자로 고려하여 예측모델을 제안하고 있다. 또한, 비선형적이고 영향인자간의 관계가 매우 복잡한 TBM 굴진성능 예측문제를 해결하기 위해서 통계적 모델에서 더 나아가 인공지능을 포함한 최적화 기법을 도입하고 있는 추세이고, 그 가능성이 여러 연구자들에 의해 검증되었다(Martins and Miranda, 2013; Yagiz and Karahan, 2015; Yagiz et al., 2009; Oraee et al., 2012; Mahdevari et al., 2014). 물론 대부분 해외에서 소개된 예측모델은 보통 1~2개의 현장자료를 토대로 제시하였기 때문에 일반화하여 적용하기 어렵다. 한편, 국내의 경우 TBM의 굴진성능 예측을 위한 최적화 기법의 적용에 대한 연구는 아직 미진한 실정이다. 인공지능을 포함한 최적화 기술은 예측 정확성이 뛰어나고, 기계학습을 사용하기 때문에 새로운 현장 데이터베이스가 추가된다 하더라도 스스로 학습하여 적응성이 있는 강력한 예측모델을 제시할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 국내에서 제시된 TBM 성능 예측 모델은 실무자들이 획득하기 난해한 영향인자들을 포함하고 있다. 물론, 획득하기 용이한 영향인자만을 고려한다면 예측의 정확성이 감소될 수 있기 때문에 향후 효율성과 정확성을 모두 고려한 신뢰성 있는 예측모델에 대한 연구 개발이 필요할 것으로 판단된다. 그리고 현재 신뢰성 있는 국내 TBM의 현장자료가 많이 부족한 실정이므로 향후 지속적으로 신뢰성 높은 데이터베이스를 구축한다면 국내외의 어느 현장에서도 적용할 수 있는 범용적인 TBM 굴진 성능 예측모델을 개발하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

<표 6.2.1> 굴진을 모델에 대한 종합 정리

NO	모델	입력인자 선정	예측기법 적용	출력인자	직경	주요 인자		국가
						지반	기계	
①	Alireza Salimi et al, 2015	방법 2	인공신경망 뉴토퍼지 서포트벡터머신	Field Penetration Index (kN/cutter/mm/rev)	6.73m (TBM 직경)	UCS, J_c	-	독일
②	Jafar Khademi Hamidi et al, 2010	방법 2	다중회귀분석 비선형다중회귀분석	Field Penetration Index (kN/cutter/mm/rev)	6.73m	UCS, RQD, J_c , α	-	이란
③	Mansour Hedayatzadeh et al, 2011	방법 2	퍼지	Penetration Rate (m/hr)	5.2m (터널 직경)	F_c , F_o , F_f	-	이란
④	Yasser Mobarra et al, 2013	방법 2	다중회귀분석	Field Penetration Index (kN/cutter/mm/rev)	4.525m	UCS, $I_{p(50)}$	-	이란
① ① ②	Javad Gholamnejad et al, 2010	방법 3	인공신경망	Penetration Rate (m/hr)	-	UCS, DPW, RQD	-	이란
⑤	Q.M Gong et al, 2009	방법 3	비선형다중회귀분석	a Specific rock mass boreability index (kN/cutter/mm/rev)	3.6m 3.3m (터널 내부직경)	UCS, Bi, J_v , α	-	중국
	Zhiye Zhao et al, 2007	방법 1	인공신경망(종류: ENN)	a Specific rock mass boreability index (kN/cutter/mm/rev)	3.6m, 3.3m (터널 내부직경)		-	싱가포르
①	Saffet Yagiz et al, 2006(1)	방법 2	다중회귀분석	Penetration Rate (m/hr)	7.06m	UCS, BTS, J_c , PI	-	터키
①	Saffet Yagiz et al, 2006(2)	방법 2	다중회귀분석	Penetration Rate (m/hr)	-	Bi, RFI($=\alpha, J_c$)	CSM_{2-100}	터키
①	Saffet Yagiz et al, 2008	방법 2	다중회귀분석	Penetration Rate (m/hr)	7.06m (터널 직경)	UCS, Bi, DPW, α	-	터키
	Saffet Yagiz et al, 2009	방법 2	비선형다중회귀분석 인공신경망					터키
	Saffet Yagiz et al, 2011	방법 1	입자무리최적화					터키
	Martins F.F et al, 2013	방법 1	서포트벡터머신 인공신경망					포르투갈
	Ebrahim Ghasemi et al, 2014	방법 1	퍼지					이란
	Saffet Yagiz et al, 2015	방법 1	차분진화 Hybrid Harmony Search(HS-BFGS) Grey Wolf Optimizer(GWO)					터키
①	Satar Mahdevari et al, 2014	방법 3	다중회귀분석 서포트벡터머신	Penetration Rate(mm/min)	7.06m (터널 직경)	UCS, BTS, Bi, DPW, α	SE, TF, CP, CT	이란
① ②	K. Oraee et al, 2012	방법 3	비선형다중회귀분석 뉴토퍼지	Penetration Rate	-	UCS, DPW, RQD	-	영국
②	J. Hassanpour et al, 2009	방법 2	단순회귀분석 다중회귀분석	Field Penetration Index (kN/cutter/mm/rev)	6.73m (TBM 직경)	- RMC UCS, RQD	-	터키
③	J. Hassanpour et al, 2010	방법 2	단순회귀분석 다중회귀분석	Field Penetration Index (kN/cutter/mm/rev)	4.65m (TBM 직경)	RMC UCS_m UCS, J_c	-	터키
⑩	J. Hassanpour et al, 2011	방법 3	다중회귀분석	Field Penetration Index (kN/cutter/mm/rev)	-	UCS, RQD	-	터키
①	A. Benato et al, 2015	방법 3	통계적방법	Penetration Rate(mm/rev)	-	UCS, GSI,	$-F_{pr}$	이탈리아
⑩	Chang et al, 2011	방법 2	다중회귀분석	Penetration Rate(mm/rev)	8.06m 3.82m 7.93m (TBM 직경)	UCS, BTS(S_p), S_{20} , DRI, CLI	-	한국
⑫	A.G Benardos et al, 2004	방법 3	인공신경망	Penetration rate (m/hr)	-	RQD, overload factor, UCS, water table surface, Rock mass weathering, RMR, overburden, permeability	-	그리스
⑬	A. Delisio et al, 2013	방법 2	다중회귀분석	Field Penetration Index_Blocky1 (kN/mm/rev)	9.43m (TBM 직경)	UCS, J_v	-	스위스
⑬ ⑭	A. Delisio et al, 2014	방법 2	비선형다중회귀분석	Field Penetration Index_Blocky2 (kN/m/mm/rev)	-	UCS, J_v	-	스위스
⑩	M. Alvarez Grima et al, 2000	방법 2	뉴토퍼지 다중회귀분석	Penetration Rate (m/hr)	-	UCS, CFF, RPM	thrust per cutter, cutter diameter	네덜란드

<표 6.2.2> 굴진을 입력인자 적용빈도

입력인자	빈도수
• UCS: Uniaxial Compressive Strength	24
• α : Angle between plane of weakness and TBM-driven direction	11
• DPW: Distance between plane of weakness	9
• Bi: Brittleness Index	10
• RQD: Rock Quality Designation	6
• RMCI: Rock Mass Cuttability Index	2
• J_s : Joint spacing	5
• J_c : Joint condition	1
• $I_{s(50)}$: Point Load Strength Index having 50mm diameter	1
• J_v : The volumetric joint count	3
• BTS: Brazilian tensile strength	3
• SE: Specific Energy	1
• TF: Thrust Force	1
• CP: Cutterhead Power	1
• CT: Cutterhead Torque	1
• $CSM_{(b-rop)}$: CSM model basic rate of penetration	1
• F_Q : fabric index of Q system	1
• F_α : The ratio UCS/cutter load	1
• F_f : $\log \text{ArcSin}(\sin \alpha_f * \sin(\alpha_t - \alpha_s))$	1
• PI: Punch penetration index	1
• F_N : Contact force applied to the disk	1
• GSI: Geological Strength Index	1
• S_{20} : Brittleness Index	1
• DRI: Drill Rate Index	1
• CLI: Cutter Life Index	1
• RMR: Rock Mass Rating	1
• overload factor	1
• overburden	1
• water table surface	1
• permeabilit	1
• Rock Mass Weathering	1
• CFF: The Core Fracture Frequency	1
• RPM	1
• Thrust per cutter	1
• cutter diameter	1

나. 해외 공동구 쉘드TBM 터널 현장 자료

본 연구를 통하여 일본 오사카에 위치한 미도스즈 공동구 쉘드 TBM터널 현장 방문하였다. 현장방문을 통하여 수집한 기술 정보는 다음 표와 같다.

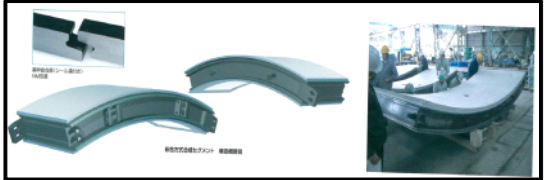
<표 6.2.3> 일본 TBM 시공현장 개요

구분	내용
현장명	오사카 미도스즈 공동구 터널
터널 구경	5m, 6m
터널 길이	약 4 km
곡선 구간	R200m, R60m
지반	자갈, 점토층
공동구 현황	상수도, 전력, 통신
기타	상향 TBM 쉘드 공법 적용(수직구 45m)

<표 6.2.4> 일본 TBM 시공현장조사 결과

현장사진	내용
	◇ 터널 입구 구간 □ RC 세그먼트 사용 □ Joint (시공성이 우수한 편방식 사용) □ 팽창지수재 사용 (수분 접촉시 팽창)
	◇ R200m 구간 □ RC 세그먼트 사용 □ 급곡선부는 대부분 Steel 세그먼트 사용 □ 일본터널의 경우 구경 3m이하는 Steel 세그먼트 적용 (특수환경에서 적용 용이, 가벼움)
	◇ 수직구 구간 □ 상향 TBM 적용 (암반층 어려움, 우산형의 커터모양) □ Steel 세그먼트 사용 (Steel 세그먼트 안에 콘크리트 채움) □ Joint (체결성 우수한 볼트 방식 사용) □ 팽창지수재 사용

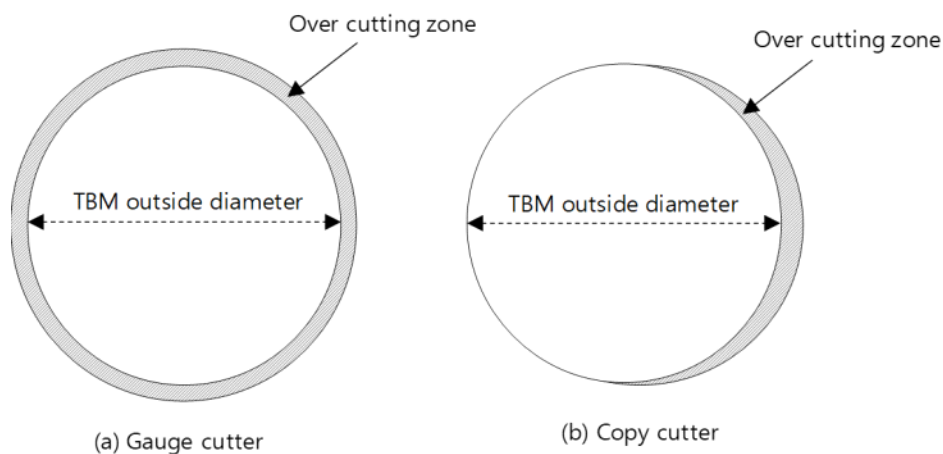
<표 6.2.5> 일본 하이브리드 세그먼트 현황

세그먼트 사양	사진
□ 스틸세그먼트 + RC 세그먼트 = 하이브리드 세그먼트(제품명 : NM 세그먼트) □ t= 380mm □ 세그먼트 조립 부분은 스틸로 제작하였으며 핀 방식 □ 핀 방식의 경우 시공성이 우수하나 조립 후 결합이 잘 되었는지 육안 확인이 안됨 □ 세그먼트 링간 결합은 그라우트 주입	

다. 카피커터 및 워터젯 시스템 특성 조사

(1) 카피커터 특성조사

카피커터(Copy cutter)는 TBM장비가 곡선반경을 따라 원활하게 굴진구역을 통과하기 위해서 원주방향으로 필요한 여굴량을 정확하게 생성할 수 있어야 한다. 일반적으로 게이지 커터는 TBM 외측방향으로 최외주 고정 비트를 이용하여 전주(全周)에 일정한 여굴을 만드는데 사용되어 카피커터와는 구분된다(<그림 6.2.1 (a)>). TBM 굴착 주변으로 전체적으로 추가여굴을 생성하는 게이지 커터(gauge cutter)와 비교하여, 카피커터는 원하는 부분만 확 굴할 수 있어야 한다(<그림 6.2.1 (b)>).



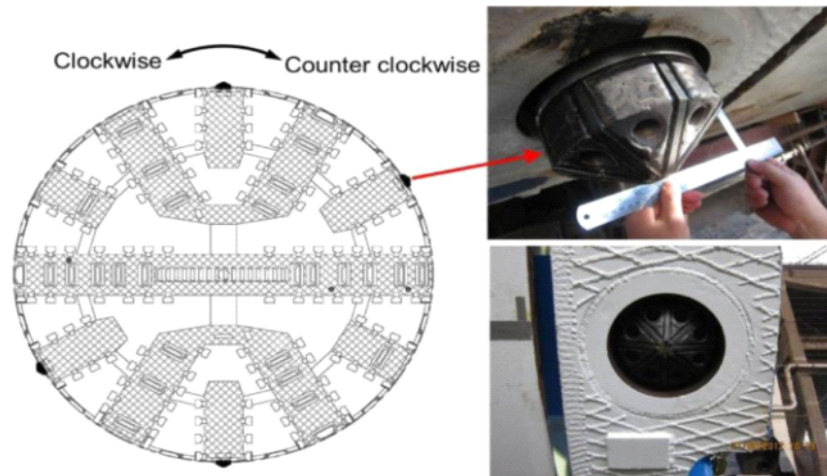
<그림 6.2.1> 카피커터와 게이지 커터의 여굴생성 범위차이

일반적인 카피커터는 토사지반을 대상으로 하고 카피커터의 형태는 <그림 6.2.2>와 같다. Chanchaya and Suwansawat(2014)는 실린더 형태의 카피커터를 최외각 4군데 설치하여 방록의 토사지반에서 EPB 쉴드 TBM의 방향성 조절에 대해 연구하였다(<그림 6.2.3>).

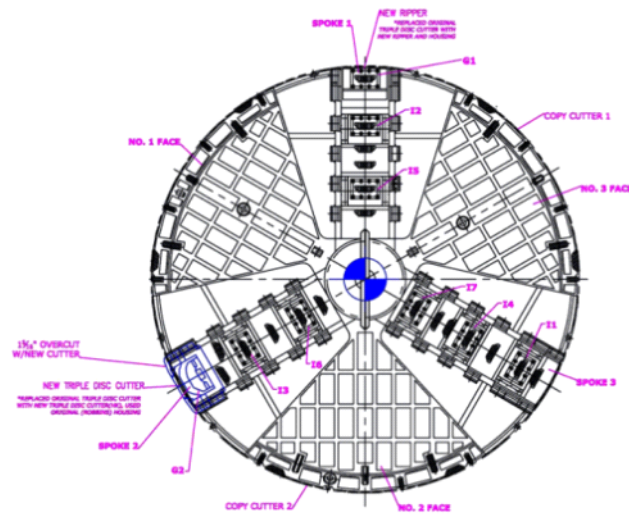
Hargreaves et al.(2011)은 TBM 장비 외곽에 설치된 2개의 카피커터를 이용하여 토사지반에서 최대 127mm 여굴을 생성하여 통과한 사례를 발표하였다(<그림 6.2.4>).



<그림 6.2.2>토사지반용 카피커터의 형태
(<https://www.alibaba.com>, <http://www.bewarder.de/tunnelling.html>)



<그림 6.2.3 토사지반에서의 카피커터의 설치 및 형태 (Chanchaya and Suwansawat, 2014)



<그림 6.2.4> 카피커터가 포함된 TBM 커터헤드 설계(Hargreaves et al., 2011)

급곡구간에서 요구되는 목표 여굴 굴착량은 급곡반경, 지반상태(지반 강도 및 암반의 유무), TBM 크기 및 형태에 의해 결정된다. <표 6.2.6>은 TBM굴착 현장에서 사용된 급곡(R)정도에 따른 카피커터의 여굴량을 보여주며, 이를 분석해보면 급곡정도가 클수록(R이 작을수록) 요구되는 카피커터의 깊이가 증가하는 것을 확인할 수 있다. R30일 경우 현장 데이터가 매우 제한적이지만, JTSC Report(2015)에 의하면 R30일 때 카피커터 여굴깊이는 7.7cm로 결정된 것을 알 수 있다. 그러나 여굴깊이는 TBM의 형태(특히 front shield의 길이)에 따라서 결정되기 때문에 모든 R30의 급곡구간에서 7.7cm로 결정되는 것은 아니다. 만약 Front shield가 길어지면 급곡구간에서 필요한 여굴의 양은 7.7cm 보다 증가할 수 있다.

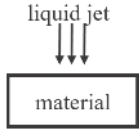
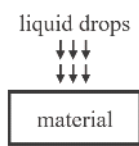
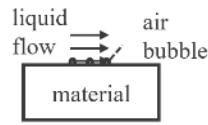
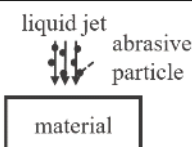
<표 6.2.6> 현장조건에 따른 카피커터의 여굴깊이

#	1	2	3	4	5		
TBM type	EPB TBM	EPB TBM (Kawasaki)	EPB TBM (Herrenknecht)	EPB TBM (Kawasaki)	EPB TBM (Japan Tunnel Systems Corporation)		
TBM Dia.(m)	15	6.43	6.46	6.43	3.44		
Geological features	Sandstone, Siltstone, Clay, Shales,	Soft clay, Stiff clay	Soft clay, Stiff clay	Soft clay, Stiff clay	Sand, Clay		
Location	Galleria Sparvo	MRT blue, Bangkok	MRTA, Thailand	MRTA, Thailand	-		
Curve R(m)	100	160	200	200	100	60	30
Copy cutter stroke(cm)	43	12	3(max)	10(max)	1.4	2.3	7.7
Note	2 copy cutter	4 copy cutter	Head length: 6.19 m	Head Length: 8.33 m	JTSC suggestion		
Ref.	Construzioni generali Catalog	Chanchaya et al.(2014)	Photayanuvat et al.(2003)	Photayanuvat et al.(2003)	JTSC Report (2015)		

(2) 워터젯 시스템 특성조사

급곡구간에서 큰 확굴량에 대응할 수 있는 커피커터는 TBM 외주로부터 편측으로 크게 돌출시킴으로써 여굴을 생성해야 한다. 그러나 암반이 분포하는 지역에서는 비트의 손상이나 파괴가 빈번히 일어나기 때문에 만족스러운 여굴생성이 어려운 실정이다. 따라서, 암반지역에서 효율적인 여굴을 생성하기 위해서는 워터젯을 이용한 암반 파쇄/절삭 기술이 필요하다. 커피커터의 역할을 수행하기 위해 기존의 워터젯 시스템을 조사하였다. 기존에 상용화된 워터젯 시스템을 4가지로 분류하고 각각의 워터젯 시스템의 특성을 분석하였다. <표 6.2.7>는 워터젯 시스템에 따른 작동 메커니즘 및 TBM에서의 활용시 한계점을 정리한 표이다.

<표 6.2.7> 워터젯 시스템에 따른 특성

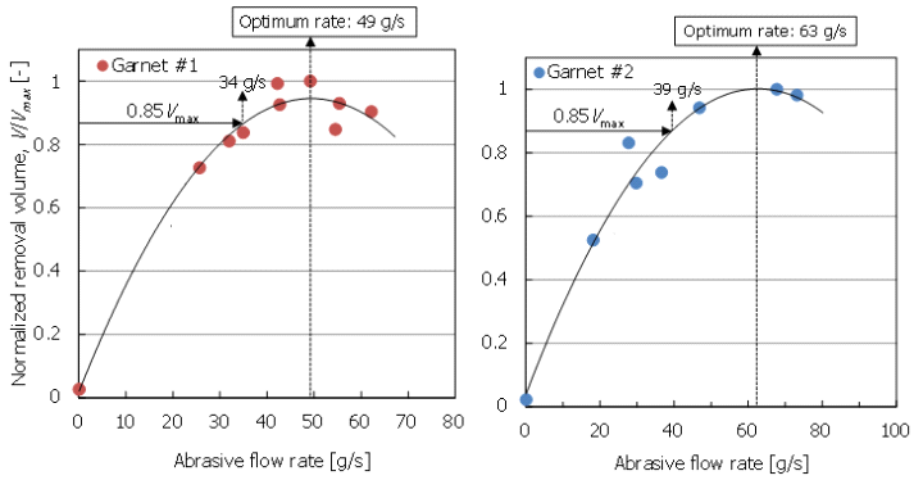
워터젯 시스템 형태		작동 메커니즘	TBM 활용에서의 한계점
순수 워터젯 (Plan waterjet)		고수압 연속류를 이용하여 암반을 파쇄함.	- 암반에서 낮은 파쇄효율을 가지기 때문에 고성능 펌프가 필요함.
펄스드 워터젯 (Pulsed waterjet)		연속류에 속도차를 주어 연속적인 충격을 통해 동적인 효과를 이용하여 암반 파쇄함.	- 수류에 속도차를 생성할수 있는 장비가 복잡하고 충격압 생성시 TBM 내부에 높은 진동이 발생됨. - 정밀한 절삭/파쇄가 어렵기 때문에 정밀한 여굴생성이 어려움.
캐비테이팅 워터젯 (Cavitating waterjet)		연속류에 공기방울을 인위적으로 생성하여 충격압을 증가시킴.	- 공기방울로 인하여 노즐 내부 마모가 심하기 때문에 TBM 내부에서 주기적 교체가 어려움. - 균질한 공기방울 생성이 어렵기 때문에 정밀한 여굴생성이 어려움.
연마재 워터젯 (Abrasive waterjet)		고속의 수류에 연마재를 투입하여 충격에너지를 증가시켜 암반을 파쇄함.	- TBM 내부에서 연마재 흐름 모니터링이 어려움. - TBM 내부에 별도의 연마재 투입장치가 필요함.

암반지역 여굴량 생성에 있어서 펄스드 워터젯(pulsed waterjet)과 캐비테이팅 워터젯(cavitating waterjet) 시스템은 장비가 복잡하고 정밀한 여굴깊이 형성이 힘들기 때문에 능동적으로 확굴을 생성해야 하는 카피커파 대용으로는 부적합한 것으로 판단된다.

라. 워터젯 영향인자 조사

(1) 연마재 투입량

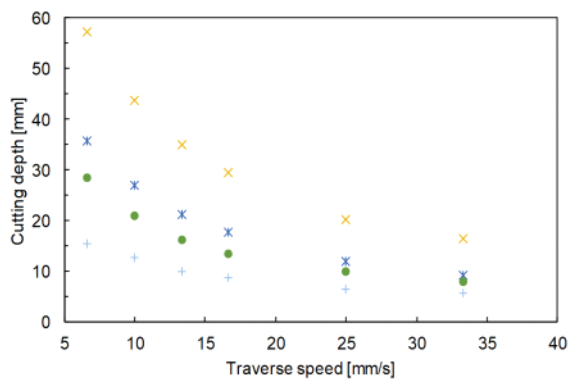
연마재의 투입은 고속수류에 입자가 가속되어 충격에너지를 증가시킨다. 일반적으로 연마재의 크기가 크고 투입량이 많아지면 동적에너지 양이 증가하여 암반에 대한 파쇄효율이 증가하게 된다. 그러나 과도한 투입량은 가속에너지의 감소와 입자간의 충돌로 인하여 오히려 파쇄효율이 감소하게 된다<그림 6.2.5>. 최적 연마재 투입량의 결정은 유량과 포커싱 튜브의 형상과 밀접한 관계를 가진다. 충분한 유량과 포커싱 튜브의 크기가 확보되면 최적 연마재 투입량은 증가하게 되고, 이에 따라 상당한 워터젯 에너지를 생성할 수 있다. 따라서, 워터젯 시스템을 암반여굴생성에 효율적으로 활용하기 위해서는 사전에 최적 연마재 투입량을 반드시 검증하여야 한다.



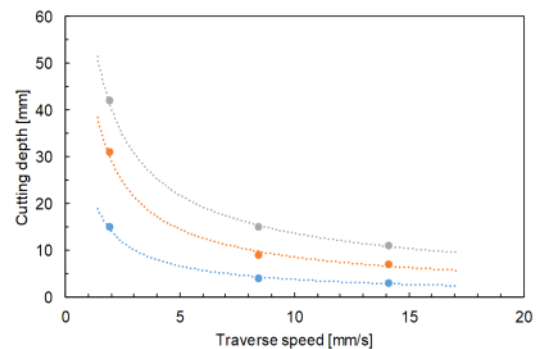
<그림 6.2.5> 연마재(석류석) 투입량에 따른 암반절삭효율 분석(Oh et al., 2015)

(2) 노즐의 이송속도 영향

TBM 회전속도는 워터젯 노즐의 이송속도와 직접적인 관계를 가진다. 그림 6.2.6은 암반에서 이송속도에 따른 기존 연구문헌의 절삭결과를 보여준다. 이송속도가 증가함에 따라 절삭결과는 비선형적으로 감소함을 확인할 수 있다. 최대 절삭깊이는 이송속도가 0에 가까운 (매우 느린) 조건에서 생성된다. 그러나 TBM의 특성상 RPM을 매우 작은 범위로 작동하는 것은 불가능하다.



(a) 워터젯 암석절삭 결과 I
(after Engin, 2012)



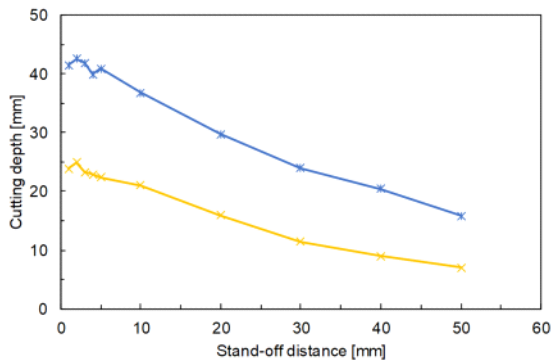
(b) 워터젯 암석절삭 결과 II
(after On and Cho, 2014)

<그림 6.2.6> 이격거리에 따른 암반절삭 깊이 변화

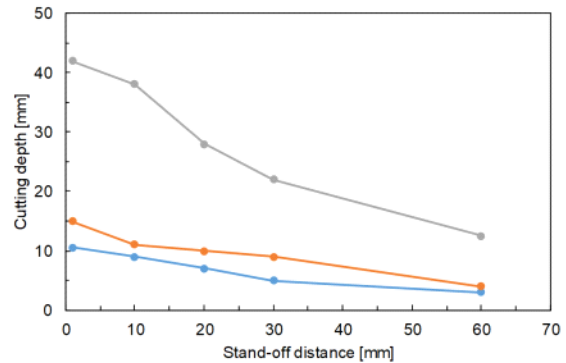
(3) 이격거리 영향

워터젯 암반절삭에서 효율에 영향을 미치는 기하학적 인자는 이격거리와 충돌각으로 고려될 수 있다. 이격거리는 절삭대상물 표면에서 포커싱 튜브 끝단까지의 거리를 의미하며, 이

격거리가 증가할수록 절삭 깊이가 감소하는 경향을 보인다. 이와같은 현상은 이격거리가 멀어짐에 따라 젯의 직진성이 감소하여 젯 분산도 증가로 인하여 발생한다. <그림 6.2.7>은 암반절삭에서 이격거리 증가에 따른 절삭깊이 감소현상을 보여준다. 따라서 급곡구간에서 암반여굴 생성시 워터젯 기술을 활용하기 위해서는 이격거리를 최소로 하는 것이 중요한 것으로 판단된다.



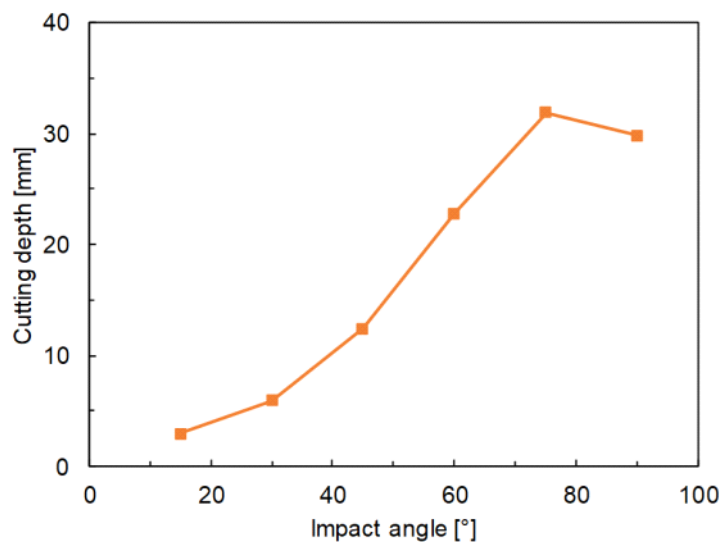
(a) 연마재 워터젯 암반절삭 실험결과 I
(after Momber and Kovacevic, 1998)



(b) 연마재 워터젯 암반절삭 실험결과 II
(after Oh and Cho, 2014)

<그림 6.2.7> 이격거리에 따른 암반절삭 깊이 변화

충돌각은 절삭대상면과 포커싱 튜브가 이루는 입사각으로 정의되며 충돌각에 따라 암석의 절삭깊이와 파쇄되는 형태도 달라진다(<그림 6.2.8>). 절삭면과 노즐이 수직일 때 충돌각의 90°로 정의한다. 15~90°의 충돌각 범위에서 암반과 같은 취성재료에 절삭한 결과, 충돌각이 70~90°일 때 최대 절삭깊이를 보인다(Momber and Kovacevic, 1998). 이와 같은 결과는 TBM 암석여굴생성에 있어서 포커싱 튜브가 가능한 수직으로 설치되는 것이 바람직한 것으로 분석된다.



<그림 6.2.8> 충돌각에 따른 절삭깊이 변화 (after Momber and Kovacevic, 1998)

마. 국외 TBM 연구동향 및 현황 분석

본 연구에서는 특수지반 분류체계 및 급속시공 매뉴얼의 개발을 위하여 국외에서 특수지반을 통과한 쉴드 TBM의 정보를 수집하였으며, 해외의 TBM분야 연구 동향을 조사하였다.

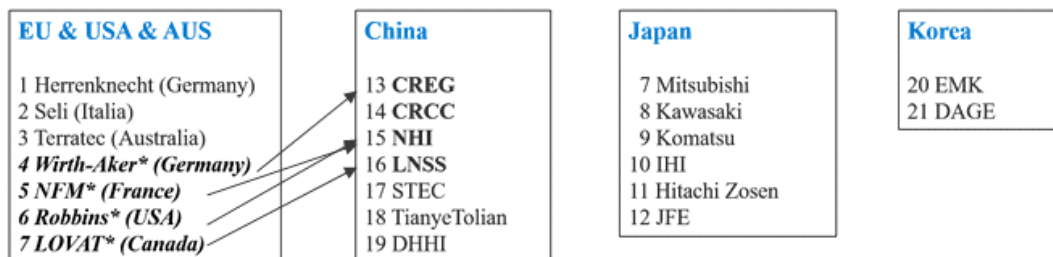
(가) 국외 TBM 제조사 현황 조사

중국은 최근 국가의 대대적인 지원을 받아 각종 연구프로젝트가 활발하게 진행되고 있으며, 중국 전반적으로 도시화가 급격히 이루어짐에 따라 도심지에서의 터널 시공 연장도 급격하게 증가하고 있으며(<그림 6.2.9>), 중국 내 TBM의 연간 사용량은 200대에 이르는 것으로 조사되었다.

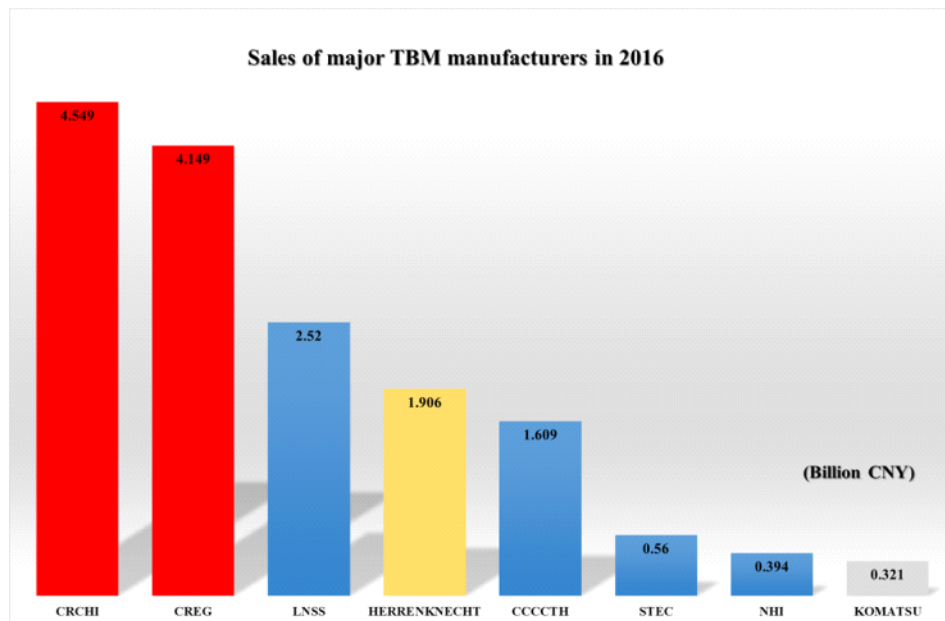


<그림 6.2.9> 중국의 지하철 노선연장 변화 추이

한편 TBM의 제조와 관련하여서도 기존의 TBM 시장을 주도하던 유럽과 미국의 제조회사들을 인수합병하여 TBM을 자체적으로 생산하고 현장에 투입하고 있다. <그림 6.2.10>는 국내외 TBM 제조회사의 현황을 보여주고 있으며, <그림 6.2.11>는 전 세계 제조회사의 TBM 장비 판매량을 비교한 것이다. 독일의 Herrenknecht사를 제외하면 중국 업체들이 가장 활발하게 장비를 제조하여 판매하고 있는 것을 알 수 있다.

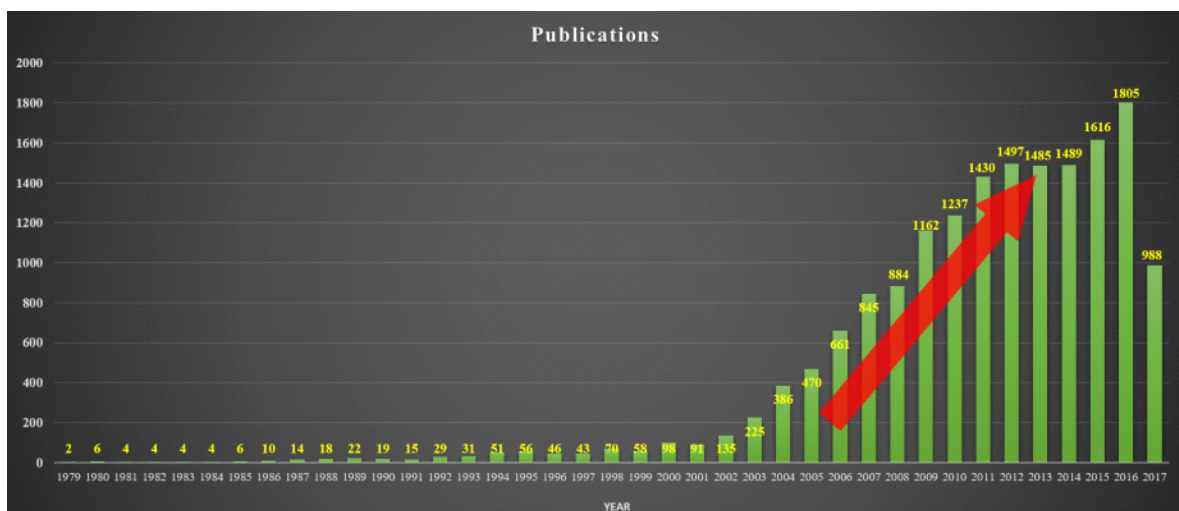


<그림 6.2.10> 국내외 TBM 제조사 현황

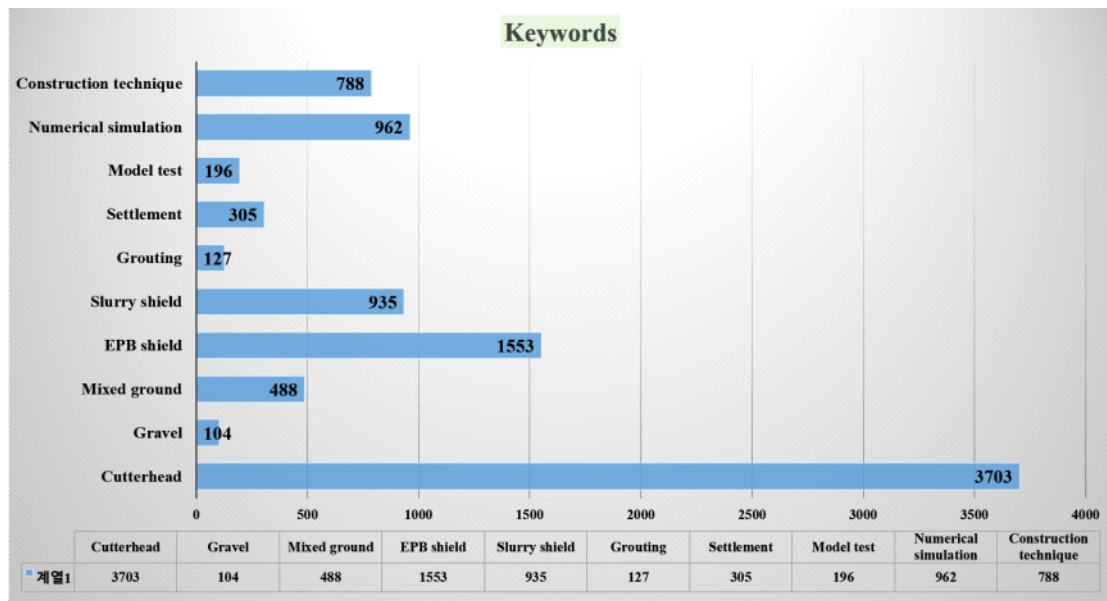


<그림 6.2.11> 전세계 TBM 제조회사의 장비 판매량 집계

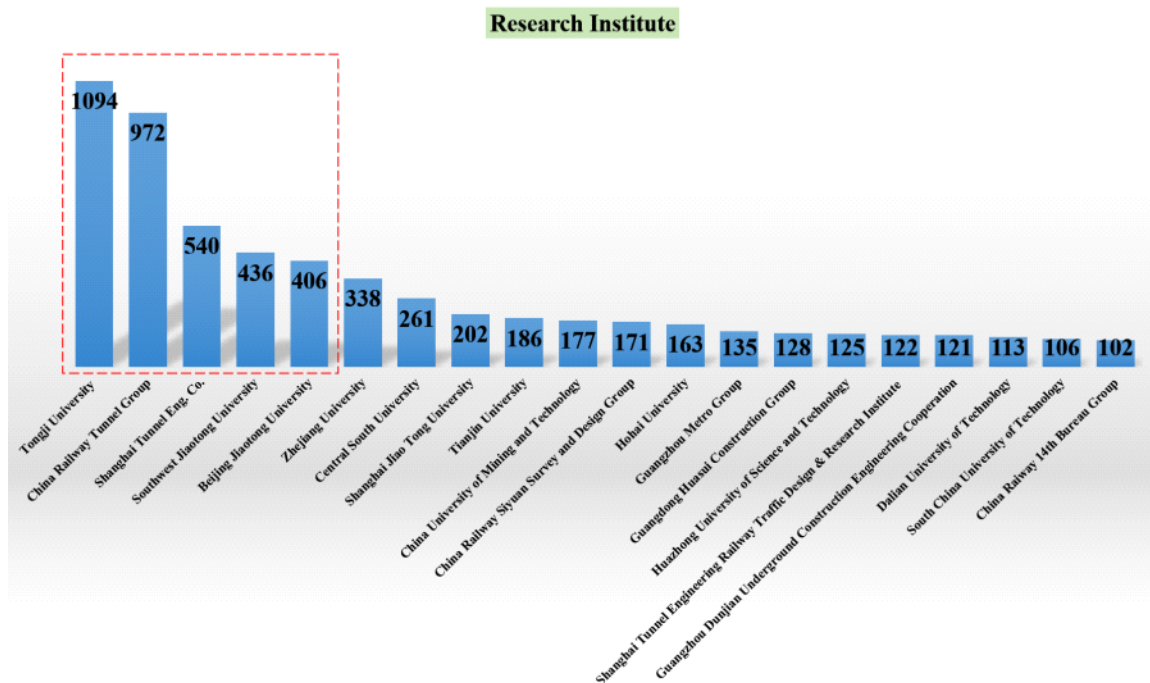
<그림 6.2.12>는 40년간 중국의 TBM관련 논문에 대한 전수조사 결과이다. 2000년 중반부터 연구가 매우 활발하게 진행되고 있는 것을 알 수 있고, 최근의 논문은 연간 2천여편에 이른다. 또한 <그림 6.2.13>는 해당 논문들에 대한 주제별 논문수를 분석한 결과이다. 중국에서도 특수지반과 관련된 지반보강, 복합지반, 자갈층, 그라우팅 등과 관련한 연구가 활발하게 이루어지고 있는 것을 알 수 있다. 한편 TBM분야에서 가장 활발한 연구를 수행하고 있는 기관으로는 동지대학, 중국중철(CREG)등이 상위기관으로 분석되었다 (<그림 6.2.14>).



<그림 6.2.12> 중국의 TBM 관련 논문 변화 추이



<그림 6.2.13> 주제별 중국의 TBM 관련 논문 수



<그림 6.2.14> 중국 연구그룹별 TBM 논문 발표 수

상기 현황조사 결과를 바탕으로 중국의 TBM제조회사를 방문하여 중국의 연구현황에 대한 정보를 수집하였다. 2세부에서 계획 중에 있는 신탄형검증시설 구축이 완료되어 활용한 실적이 이미 있다는 것이며, 이외에도 회전식절삭시험기, 선형절삭시험기, 시공데이터수집센터, TBM 운전자 가상훈련시설 등을 보유하고 있었으며 (<그림 6.2.15>), 연간 TBM 500여 대를 제작할 수 있는 인프라를 보유하고 있는 것으로 조사되었다.



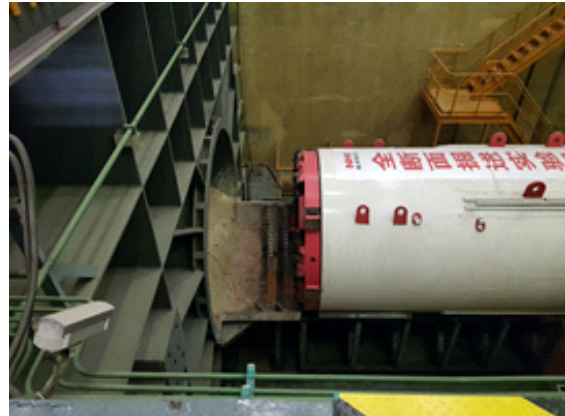
(a) 회전식 절단 시험기 (중국중철)



(b) 커터헤드 절삭시험기 (중국중철)



(c) 빅데이터 센터 (중국중철)



(d) 실험형 성능 검증시설 (북방중공업)

<그림 6.2.15> 중국 TBM 제조사 핵심연구시설(key laboratory)의 연구인프라

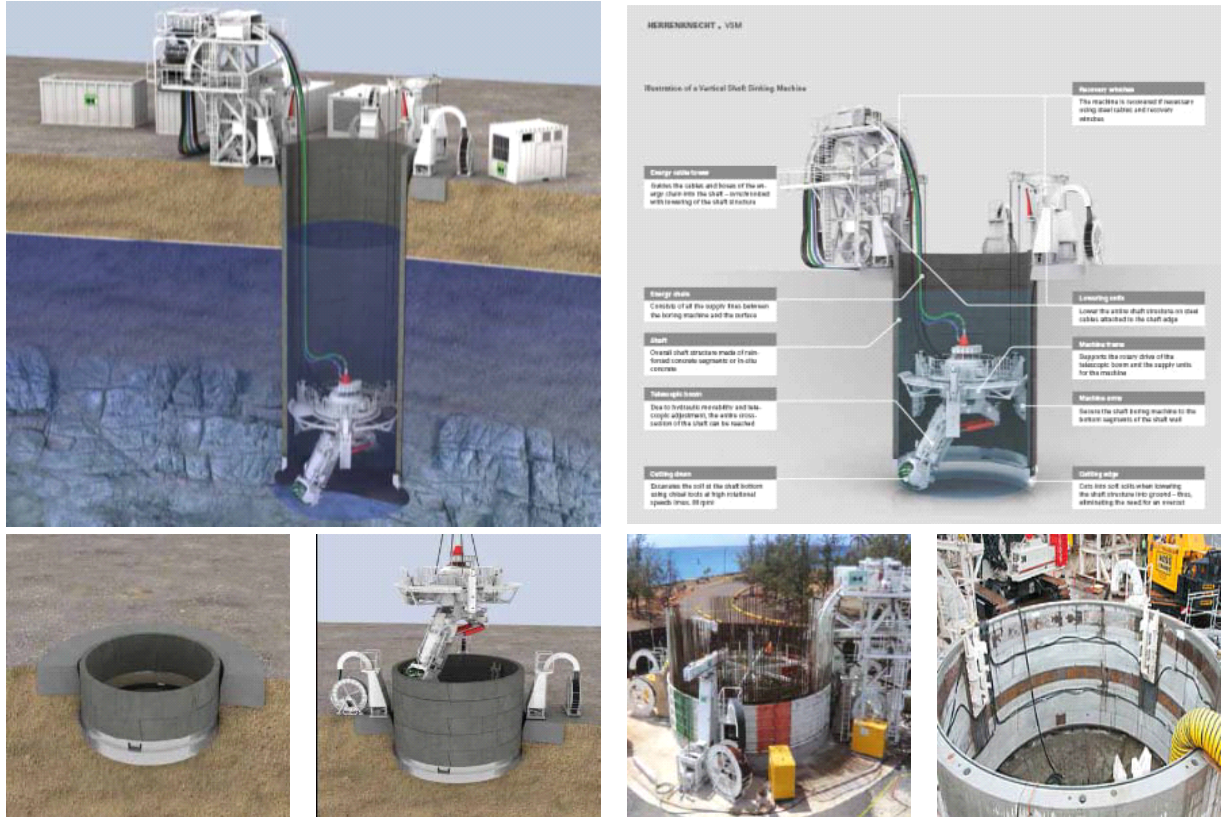
3. 공동구용 수직구 급속시공을 위한 저소음/무진동 시공시스템, 보장/차수 기술 개발

가. 하향식 급속성형장치 해외 유사공법 조사

(1) Herrenknecht AG(독일)

- ① 굴착과 동시에 벽체를 시공하는 공법이다. 굴착장비는 TBM 장비와 유사한 형태로 하부로 내려가면서 굴착을 하며 암반까지 굴착이 가능하다.
- ② 상부에는 먼저 굴착장비를 설치하기 위한 콘크리트 지지층을 시공한다. 지지층위에는 굴착장비 부가시설 등이 배치된다. 굴착이 시작되면 프리캐스트로 제작된 라이닝 벽체를 삽입한다.
- ③ 굴착과 동시에 벽체가 시공되므로 시공이 매우 빠르다. 그러나 상부에 구비되는 부

지가 매우 넓게 필요하며, 진동과 소음이 심해 도심지에서는 적합하지 않을 것으로 판단된다. 벽체는 방수처리가 매우 중요하며 라이닝 사이의 이음부 처리 역시 매우 중요하다. 그리고 장비 비용이 매우 고가여서 소규모 공사에는 적합하지 않다.



<그림 6.3.1> 수직구 굴착 전경(독일 업체 사례)

(2) Humes(호주)

- ① 케이슨을 이용하여 지하수 침투를 방지하고 하부로 굴착하며, 프리캐스트 벽체를 시공하는 공법이다.
- ② 각각의 프리캐스트 벽체는 내부에 연결된 홀을 통해 볼트 방식으로 결합된다. 하부에는 상부 벽체를 지지하는 구조물을 통해 아래로 내려가며 벽체가 조립된다.
- ③ 프리캐스트 벽체 하부의 굴착된 공간에서 조립이되는 방식이며 상부에서 크레인을 통해 프리캐스트 벽체를 수직구로 내려준다.
- ④ 내려온 프리캐스트 벽체는 특수 조립 장치를 통해 매달리며 조립되는 형식이다.
- ⑤ 본 공법은 각각의 프리캐스트 벽체를 결합하기 위한 볼트 연결구조의 장치가 특화되어있다.
- ⑥ 굴착은 재래식 방법으로 굴착되며 암반은 굴착이 어려워 발파를 해야 한다.
- ⑦ 발파의 이유로 도심지 등에서는 매우 불리하다.



<그림 6.3.2> 수직구 굴착 전경(호주 업체 사례)

제7장. 연구개발성과의 보안등급

1. 보안등급의 분류 및 결정사유

보안등급 분류	보안	일반
	-	○
결정사유	본 과제의 연구 성과의 공개는 국내 도심지 소단면 공동구 설계 및 시공기술 개발의 발전에 기여할 수 있을 것으로 판단됨. 연구 과제서 개발된 기술의 공개로 인한 기술유출의 가능성은 적음.	

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천 원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호
한국 전력 공사 전력 연구원	EPB Shield TBM Φ3,540mm	EPB Shield TBM Φ3,540mm	1	2018.05.23	2,150,000 (VAT 포함)	이엠코리아(주) (055-211-9600)	한국과학기술 술원 문지캠퍼스 공동연구원 센터	NFEC-2018 -07-244876
한국과 학기술 원	소단면 TBM 실대형 성능검증 실험동	-	1	2018.12.03	3,146,959	제이비건설 주식회사	한국과학기술 술원 문지캠퍼스	-
한국과 학기술 원	소단면 TBM 선단부 실대형 성능검증 지상굴진시험 장비	-	1	2018.08.14	359,000	(주)다올산업	한국과학기술 술원 문지캠퍼스	-

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

1. 연구실 안전 조치 이행실적

가. 도심지 터널식 공동구 최적 설계용량산정 및 글로벌 표준화 설계기술 개발

해당사항 없음.

나. 2세부: 도심지 소단면 터널식 공동구 굴진율 예측기법과 급곡구간/특수지반 급속 시공 기술 개발

(1) 기관명 : 한국전력공사 전력연구원

(가) 기술적 위험요소 분석

① 쉘드TBM 실험실시험 수행 중 안전사고 발생 예방

(나) 안전관리 대책

① 실험장비 사용 교육 : 국외 기술자 자체 교육 (3회)

② 쉘드TBM 실험실시험 안전교육 : 실험자 자체 교육 (매 실험시)

③ 안전을 위한 실험환경 조성 : CCTV, Siren, 안전표지판, 안전용품 등

(2) 기관명 : 서울대학교 산학협력단

(가) 기술적 위험요소 분석

① 암석 시료 성형 및 실내시험 수행 중 안전사고 발생 예방

(나) 안전관리 대책

① 실험장비 사용 교육: 연구원 전체 자체 교육 (6개월 1회)

② 안전관리 우수연구실 인증 : 과학기술정보통신부 주관 안전관리 우수연구실 인증 (2년 1회)

(3) 기관명 : 한국과학기술원

(가) 기술적 위험요소 분석

① 중량의 시험장비로 인한 깔림 및 부딪힘 사고

② 토조박스 위에서의 추락사고

③ 분진 발생으로 인한 호흡기 문제 야기

(나) 안전관리 대책

- ① 시험시 안전 가이드를 설치하여 안전공간 확보 및 안전모 항상 착용
- ② 토조박스위 안전난간 설치
- ③ 살수기를 이용하여 분진 날림 억제 및 방진 마스크 착용

다. 공동구용 수직구 급속시공을 위한 저소음/무진동 시공시스템, 보강/차수 기술 개발

해당사항 없음.

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

1. 특허등록

No.	요소기술 구분	특허명칭	등록번호	등록일	출원인 (등록권리자)
1	1-사	시추공을 이용한 풍화대 강도특성 측정장치	10-1904187	2018.09.27	(주)희송지오테크
2	2-가	흙막이 가시설 구조물	10-1908371	2018.10.10	한국전력공사 전력연구원
3	2-가	철탐 기초 제원 예측 방법	10-1928193	2018.12.05	한국전력공사 전력연구원
4	2-나	셸드 TBM의 순굴진속도 예측 장치 및 그 방법	10-1967978	2019.04.04	인하대학교
5	2-나	셸드 TBM의 실굴진속도 예측 장치 및 그 방법	10-2003612	2019.07.18	인하대학교
6	2-다	경압용 커터헤드	30-0935782	2017.12.11	이엠코리아(주)
7	2-마	셸드 TBM 터널용 매크로 합성섬유 보강 콘 크리트 조성물 및 이에 의하여 제조된 셸드 TBM 터널용 콘크리트 세그먼트	10-1794960	2017.11.01	(주)콘텍이엔지
8	2-마	셸드 TBM 터널용 하이브리드 세그먼트	10-2081959	2020.02.20	(주)콘텍이엔지
9	2-사	워터젯을 이용한 여굴 굴착 장치 및 방법	10-2101868	2020.04.10	부산대학교
10	2-차	TBM용 프로브 드릴 어셈블리	10-2095678	2020.03.25	(주)동아지질
11	2-타	열 전도도 측정 장치	10-1881921	2018.07.19	한국과학기술원
12	2-타	소단면 TBM 선단부의 굴진 시험 장비	10-1987866	2019.06.04	한국과학기술원
13	3-가	수직구 굴착시스템 및 이를 이용한 수직구 시 공방법	10-2002526	2019.07.16	한국과학기술원
14	3-가	수직구 외주면 굴착시스템	10-2002525	2019.07.16	한국과학기술원

No.	요소기술 구분	특허명칭	등록번호	등록일	출원인 (등록권리자)
15	3-가	수직구 굴착방법	10-2059051	2019.12.18	한국과학기술원
16	3-가	수직구 굴착 시스템	10-2079802	2020.02.14	한국과학기술원
17	3-다	할암장치	10-1803452	2017.11.24	(주)제영이앤씨
18	3-다	암반굴착장치	10-1858060	2018.05.09	(주)제영이앤씨
19	3-다	암반 급속굴착을 위한 일체형 구조를 갖는 굴착 장치	10-2067515	2020.01.13	(주)제영이앤씨
20	3-라	하향식 공법용 수직구 압입장치 및 이를 이용 한 수직구 시공방법	10-2001526	2019.07.12	(주)네오시티
21	3-라	다양한 브라켓 연결수단을 갖는 수직구조물용 프리캐스트 콘크리트 세그먼트 블록	10-2026112	2019.09.23	(주)네오시티
22	3-라	수직구 구조물의 수평터널 연결부 성형장치	10-2102593	2020.04.14	(주)네오시티
23	3-마	공동구용 터널-수직구 접속부 보강 차수 구조	10-1820872	2018.01.16	(주)세니츠 코퍼레이션
24	3-마	공동구용 터널-수직구 접속부 보강 차수 구조	10-1859611	2018.05.14	(주)세니츠 코퍼레이션
25	3-마	공동구용 터널-수직구 접속부 보강 차수 구조	10-1859612	2018.05.14	(주)세니츠 코퍼레이션
26	3-마	공동구용 터널-수직구 접속부 보강 차수 장치 및 그 시공방법	10-1968968	2019.04.09	(주)세니츠 코퍼레이션
27	3-마	공동구용 수직구 접속부 보강 차수 구조	10-2103978	2020.04.17	(주)세니츠 코퍼레이션
28	3-바	지반 개량용 차수재, 이를 이용하는 지반 내 차수를 위한 개량 방법, 및 이를 테스트하기 위한 실험 장치	10-2040869	2019.10.30	한국과학기술원

2. 학술지 게재

No.	요소기술 구분	SCI/ 일반	논문명	학술지명	ISBN ISSN	주저자명	Vol. (No)	시작 페이지	끝 페이지	게재 일자
1	1-가	일반	도심지 공동구 최적 설계를 위한 평가 모델 개발	한국터널지하공 간학회 논문집	2287-4747	심영중	19(3)	437	447	2017. 05.31
2	1-가	일반	VE/LCC 분석을 통한 공동구 수용시설물의 최적 대안 결정 기법	한국터널지하공 간학회 논문집	2287-4747	심영중	20(2)	317	329	2018. 03.31
3	1-가	일반	기본 계획 단계에서의 공동구 수용시설물 결정 기법	한국터널지하공 간학회 논문집	2465-9703	오원준	21(1)	79	92	2019. 01.31
4	1-나	일반	터널식 공동구 최적단면 설계기술 개발	한국터널지하공 간학회 논문집	2287-4747	박광준	20(6)	1073	1090	2018. 11.30
5	1-다	일반	도심지 유형별 공동구 설치 타당성 평가시스템 개발에 관한 기초 연구	한국터널지하공 간학회	2287-4747 2233-8292	이성원	19(1)	11	27	2017. 01.31
6	1-다	일반	강재주열벽을 적용한 지하건축물 가설공법의 개발 및 강재주열벽의 휨성능 연구	한국터널지하공 간학회	2287-4747 2233-8292	정지승	19(6)	937	957	2017. 11.30
7	1-다	일반	계층의사분석 기법을 적용한 도심지 공동구 타당성 평가모델 연구	한국터널지하공 간학회	2287-4747 2233-8292	정지승	20(1)	131	144	2018. 01.31
8	1-라	일반	공동구의 정량적 경제성 평가를 위한 항목별 중요도 분석	한국터널지하공 간학회 논문집	2287-4747	조중연	20(1)	119	130	2018. 01.31
9	1-라	일반	건설공사의 작업불능일 기준설정에 의한 보정계수 계산 및 적용을 통한 최적공기 산정	한국산학기술학 회 논문집	2288-4688	이필윤	19(12)	669	676	2018. 12.31
10	1-라	일반	리스크 매트릭스를 활용한 PSC박스 거더교의 긴장재 평가	한국건설관리학 회 논문집	2465-9703	김형조	19(5)	53	60	2018. 09.30
11	1-라	일반	기존시가지의 규모(면적)에 따른 공동구 설치 타당성에 관한 연구	대한토목학회 논문집	2287-934 X	오원준	39(6)	903	911	2019. 12.01
12	1-라	일반	타당성 평가지표를 활용한 터널식 공동구 설치가능지역 검토	한국터널지하공 간학회 논문집	2287-4747	오원준	21(6)	795	810	2019. 11.30

No.	요소기술 구분	SCI/ 일반	논문명	학술지명	ISBN ISSN	주저자명	Vol. (No)	시작 페이지	끝 페이지	게재 일자
13	1-라	일반	공동구 기본계획 기준수립을 위한 절차 및 적용사례에 대한 연구	한국건설관리학 회논문집	2005-6095 2465-9703	오원준	21(4)	100	107	2020.07
14	1-마	일반	터널 라이닝의 내진성능 간편 평가법 제안	한국터널지하공 간학회논문집	2287-4747 2233-8292	안재광	20(2)	361	374	2018. 03.31
15	1-마	일반	기존시가지의 공동구 건설을 위한 표준공기 산정에 대한 연구	한국산학기술학 회논문지	1975-4701	이성원	19(12)	677	685	2018. 12.31
16	1-마	일반	정량적 지표평가와 비용 · 편익 분석을 활용한 도심지 공동구의 타당성 평가기법 연구	한국터널지하공 간학회	2287-4747 2233-8292	이성원	21(1)	61	77	2019. 01.31
17	1-마	일반	샐드 터널 세그먼트 라이닝의 신뢰성 설계를 위한 변수의 변동계수 결정	한국터널지하공 간학회논문집	2287-4747 2233-8292	변요셉	21(6)	875	885	2019. 11.30
18	1-바	일반	샐드터널 세그먼트라이닝설계 에서 빔-스프링 구조모델이 단면력에 미치는 영향	한국터널지하공 간학회논문집	2283-8292	김홍문	19(2)	179	194	2017. 03.31
19	1-바	일반	한계상태설계법-AA SHTO LRFD를 적용한 샐드터널 세그먼트 라이닝의 구조해석 영향인자 평가	한국터널지하공 간학회논문집	2283-8292	김양운	20(1)	99	118	2018. 01.31
20	1-바	일반	조인트 버스팅을 고려한 세그먼트 라이닝 구조해석 및 설계방법	한국터널지하공 간학회논문집	2283-8292	김홍문	20(6)	1125	1146	2018, 11.30
21	1-사	일반	한계상태설계법 지반정수 산정을 위한 풍화대 강도특성 측정장치의 개발 및 현장적용에 관한 연구	터널과 지하공간	1225-1275	김기석	30(2)	164	179	2020. 04.30
22	1-아	일반	샐드 터널 세그먼트 라이닝의 내진설계를 위한 신뢰성해석	한국터널지하공 간학회논문집	2283-8292	박영빈	22(3)	249	259	2020. 05.31
23	1-아	일반	신뢰성 기반 샐드터널의 한계상태설계를 위한 지진하중 효과의 변동계수에 관한 연구	한국터널지하공 간학회논문집	2283-8292	박영빈	22(3)	311	321	2020. 05.31

No.	요소기술 구분	SCI/ 일반	논문명	학술지명	ISBN ISSN	주저자명	Vol. (No)	시작 페이지	끝 페이지	게재 일자
24	1-차	일반	TBM 터널 굴착 안정성에 영향을 미치는 위험요소 도출 및 중요도 결정	한국터널지하공 간학회 논문집	2233-8292	성주현	19(6)	973	983	2017. 11.30
25	1-차	일반	합리적인 건설안전 관리를 위한 건설기술진흥법상 안전관리비의 적정요율 산정에 관한 연구	한국안전학회 논문집	1738-3803	윤영근	33(5)	84	91	2018. 10.31
26	1-차	일반	도심지 소단면 터널식 공동구의 핵심 안전 위험요소 및 위험성 평가 연구	한국터널지하공 간학회 논문집	2233-8292	성주현	20(6)	931	946	2018. 11.30
27	1-차	일반	건설업 사고 발생원인 파악을 위한 사고 분석 모델 개발	한국안전학회 논문집	1738-3803	임원준	34(1)	45	52	2019. 02.28
28	1-차	일반	국내 유해화학물질 폭력사건 예방을 위한 개선방안 연구	한국가스학회지	1226-8402	이덕재	21(4)	62	69	2017. 08.30
29	1-차	일반	항만 위험·유해화학물질 안전관리 개선방안 연구	한국방재학회	2287-6723	이덕재	18(4)	333	340	2018. 06.30
30	1-차	일반	도심지 터널식 지하공동구의 화재예방 및 안전관리를 위한 위험성 평가 시나리오 구축	한국방재학회	2287-6723	서현정	19(1)	241	248	2019. 01.30
31	1-차	일반	방유벽 내 위험·유해화학물질 대기 확산 방지를 위한 안전시스템 연구	한국소방학회 논문지	1738-7167	이덕재	33(4)	97	104	2019. 08.31
32	1-차	일반	도심지 터널식 공동구 시공 중 대형건설재해 피해 저감을 위한 Activity Diagram 개발	한국방재학회 논문집	1738-2424	한용식	20(1)	281	289	2020. 02.28
33	2-가	일반	전기비저항을 이용한 지하매설물 탐사(Ⅱ)- 현장실험 중심으로	한국터널지하공간 학회논문집	2287-4747	류희환	19(3)	449	461	2017. 05.31
34	2-가	일반	셸드TBM 굴진주요 영향인자 분석 및 굴진을 예측모델 제시	한국터널지하공간 학회논문집	2287-4747	조선아	21(3)	347	362	2019. 05.31

No.	요소기술 구분	SCI/ 일반	논문명	학술지명	ISBN ISSN	주저자명	Vol. (No)	시작 페이지	끝 페이지	게재 일자
35	2-가	일반	해저터널 굴진자료 분석을 통한 FPI와 비에너지의 경험식 제시	한국터널지하공간 학회논문집	2287-4747	김경열	20(4)	687	699	2018. 07.31
36	2-가	SCI	A new geophysical exploration method based on electrical resistivity to detect underground utility lines and geological anomalies : Theory and filed demonstrations	Geomechanics and Engineering	2092-6219	조선아	18	527	534	2019. 07.19.
37	2-가	일반	Development of a TBM advance rate model and its field application based on full-scale shield TBM tunnelling tests in 70MPa of artificial rock mass	KEPCO Journal	2466-0124	김정주	-	-	-	2020. 06.30. (예정)
38	2-나	일반	TBM 굴진성능 예측모델 분석: 리뷰	한국터널지하공간 학회논문집	2287-4646 (ISSN)	이항로	18(2)	245	256	2016. 03.31
39	2-나	일반	운영 중 해저 터널의 안정성 평가를 위한 역해석 프로그램 개발: 종단방향	한국터널지하공간 학회논문집	2287-4646 (ISSN)	안준상	18(6)	545	556	2016. 11.30
40	2-나	SCI	Prediction of Fragmentation Zone Induced by Blasting in Rock	Rock Mechanics and Rock Engineering	0723-2632 (ISSN)	Youngjong Sim	50(8)	2177	2192	2017. 04.10
41	2-나	일반	최상부분집합이 고려된 능형회귀를 적용한 현장관입지수에 대한 통계적 예측기법 개발 및 적용	한국터널지하공간 학회논문집	2287-4646 (ISSN)	이항로	19(6)	857	870	2017. 10.30
42	2-나	SCI	The Effect of Confining Pressure and Water Content on Energy Evolution Characteristics of Sandstone under Stepwise Loading and Unloading	Advances in Civil Engineering	1687-8086 (ISSN)	Shuren Wang	20(18)	-	-	2018. 02.19
43	2-나	SCI	Performance-Based Evaluation of a Double-Deck Tunnel and Design Optimization	Sustainability	2071-1050 (ISSN)	Kyung-Nam Kang	11(1)	201	-	2019. 01.03

No.	요소기술 구분	SCI/ 일반	논문명	학술지명	ISBN ISSN	주저자명	Vol. (No)	시작 페이지	끝 페이지	게재 일자
44	2-다	일반	수치해석을 통한 급곡선 구간Shield TBM의 중절책 및 스킨플레이트 구조에 관한 연구	한국터널지하공 간학회논문집	2287-4747	강신현	19(3)	421	435	2017. 05.31
45	2-다	일반	개별요소법을 이용한 스크래퍼 비트방향이 토사지반에서의 쉴드 TBM 굴진에 끼치는 영향 연구	한국터널지하공 간학회논문집	2287-4747	권태혁	21(5)	689	698	2019. 09.30
46	2-라	일반	축소모형실험을 통한 급곡선 터널에서의 Shield-TBM 추진 압력 적용 기술에 대한 연구	한국터널지하공 간학회논문집	2233-8292	강시운	19(2)	335	353	2017. 03.31
47	2-라	일반	급곡구간 굴착을 위한 Shield-TBM 축소모형 장비 시스템 개발	한국터널지하공 간학회논문집	2287-4747	공민택	21(6)	849	860	2019. 11.30
48	2-마	SCI	Performance Evaluation and Field Application of Red Clay Green Roof Vegetation Blocks for Ecological Restoration Projects	Sustainability	2071-1050	Hwang-He e Kim	9(3)	1	6	2017. 02.28
49	2-마	SCI	Mechanical Properties and Durability of Latex-Modified Fiber-Reinforced Concrete: A Tunnel Liner Application	Advances in Materials Science and Engineering	1687-8434	Joo-Ha Lee	-	1	14	2018. 01.21
50	2-마	일반	GFRP plate를 적용한 섬유보강세그먼트의 휨성능 평가	한국터널지하공 간학회논문집	2287-4747	오리온	20(5)	1	16	2018. 09.30
51	2-바	일반	세그먼트 시공오차에 따른 이음부 지수재별 방수성능 평가	한국터널지하공 간학회논문집	2287-4747	허승무	20(6)	1023	1037	2018. 11.30
52	2-바	SCI	Experimental study on effect of underground excavation distance on the behavior of retaining wall	Geomechanics & engineering	2005-307x	이석원	17(5)	413	420	2019. 04.10
53	2-바	일반	쉴드 TBM 세그먼트 지수재의 배열수 변화에 따른 방수성능 평가	한국터널지하공 간학회논문집	2287-4747	함수권	22(1)	47	58	2020. 01.31

No.	요소기술 구분	SCI/ 일반	논문명	학술지명	ISBN ISSN	주저자명	Vol. (No)	시작 페이지	끝 페이지	게재 일자
54	2-사	SCI	Effect of Garnet Characteristics on Abrasive Waterjet Cutting of Hard Granite Rock	Advances in Civil Engineering	1687-8086	오 태 민	2019	1	12	2019. 03.12
55	2-사	SCI	Effect of Abrasive Feed Rate on Rock Cutting Performance of Abrasive Waterjet	Rock Mechanics and Rock Engineering	0723-2632	오 태 민	2019 (52)	3431	3442	2019. 03.18
56	2-아	일반	퇴적층 암석의 픽 커터 절삭성능 평가를 위한 선형절삭시험	한국터널지하공간학회논문집	2233-8292	정호영	20(10)	161	182	2018. 01.31
57	2-아	일반	특수지반에서 쉘드TBM의 시공을 위한 기술적 고찰	터널과지하공간	1225-1275	정호영	28(1)	1	24	2018. 02.28
58	2-아	일반	Development and research trends of TBM manufacturing technology	한국자원공학회지	2288-0291	Zhang Nan	55(4)	314	322	2018. 08.29
59	2-아	일반	특수지반에서 쉘드TBM 굴착 시 프리그라우팅 적용사례 고찰	터널과지하공간	1225-1275	윤영민	28(6)	528	546	2018. 12.31
60	2-아	일반	유전자 프로그래밍과 개체군집최적화를 이용한 픽 커터의 절삭비에너지 예측모델	터널과지하공간	1225-1275	Shahabedin Hojjati	28(6)	651	669	2018. 12.31
61	2-아	일반	단층대와 복합지반을 통과하는 쉘드TBM의 굴진율 및 다운타임 발생 특성 분석	터널과지하공간	1225-1275	정호영	29(6)	394	406	2019. 12.31
62	2-자	일반	특수지반 구간의 소단면 쉘드 TBM 터널 굴착 시 최적 보강영역 연구	한국터널지하공간학회논문집	2287-4747 2233-8292	강병윤	21(6)	735	747	2019. 11.30
63	2-자	일반	매개변수 분석을 통한 단층파쇄대의 소단면 쉘드 TBM 터널 굴착 시 최적 보강영역 연구	한국터널지하공간학회논문집	2287-4747 2233-8292	강병윤	22(3)	261	275	2020. 05.31
64	2-타	일반	경암의 취성도와 TBM 순굴진율간의 관계	한국터널지하공간학회논문집	2233-8292	이기준	19	611	634	2017. 07.31

No.	요소기술 구분	SCI/ 일반	논문명	학술지명	ISBN ISSN	주저자명	Vol. (No)	시작 페이지	끝 페이지	게재 일자
65	2-타	일반	EPB-TBM 암반굴착시 스크류컨베이어의 배토 거동에 대한 DEM 기반 수치해석적 연구	한국터널지하공 간학회논문집	2233-8292	이기준	21	127	136	2019. 01.31
66	2-타	SCI	Characteristics of steady-state propagation of hydraulic fractures in ductile elastic and two-dimensionally confined plate media	International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences	1365-1609	함수민	114	164	174	2019. 02.01
67	2-타	SCI	Video data of hydraulic fracture propagation in two-dimensionally confined gelatin plates	Data in Brief	2352-3409	함수민	25	-	-	2019. 06.15
68	3-가	일반	2차원 수치해석을 통 한 초저심도 박스형 터널 편측확폭시 지 반침하거동 특성 분 석	한국터널지하공 간학회논문집	2233-8292	차요한	18(1)	83	94	2016. 01.30
69	3-가	일반	점성토 지반 수직구 굴착 중 히빙 안정성 증가에 대한 관내토 효과에 대한 실험적 연구	한국터널지하공 간학회논문집	2233-8292	강석준	20(1)	183	195	2018. 01.31
70	3-가	일반	3차원 형상을 고려한 점성토 지반 원형 수 직구 굴착 중 히빙에 대한 안전율 산정을 위한 연구	한국터널지하공 간학회논문집	2233-8292	강석준	20(4)	717	729	2018. 07.31
71	3-가	일반	3차원 수치해석을 이 용한 지진 시 수직구 -터널 접속부 동적 거동 분석	한국터널지하공 간학회논문집	2233-8292	김정태	20(5)	887	897	2018. 09.30
72	3-가	일반	지진 시 공동구용 수 직구-터널 접속부 거 동에 대한 경계면 강 성 계수의 영향	한국터널지하공 간학회논문집	2287-4747	김정태	21(6)	861	874	2019. 11.30
73	3-바	SCI	Strength and Dynamic Properties of Cement-Mixed Korean Marine Clays	KSCE Journal of Civil Engineering	1226-7988	김아람	22(4)	1150	1161	2017. 07.14

No.	요소기술 구분	SCI/ 일반	논문명	학술지명	ISBN ISSN	주저자명	Vol. (No)	시작 페이지	끝 페이지	게재 일자
74	3-바	SCI	Shear strength behavior and parameters of microbial gellan gum-treated soils: from sand to clay	Acta Geotechnica	1861-1125	장일환	14(2)	361	375	2019. 04.01
75	3-바	SCI	Laboratory triaxial test behavior of xanthan gum biopolymer-treated sands	Geomechanics and Engineering	2092-6219	이소정	17(5)	445	452	2019. 07.18
76	3-바	SCI	Xanthan Gum Biopolymer as Soil-Stabilization Binder for Road Construction Using Local Soil in Sri Lanka	Journal of Materials in Civil Engineering	0899-1561	이소정	31(1)	06019012		2019. 08.21
77	3-가(바)	SCI	Preliminary study on the ground behavior at shore connection of submerged floating tunnel using numerical analysis	Geomechanics and Engineering	2005-307x	강석준	21(2)	133	142	2020. 04.25

3. 소프트웨어 등록

No.	요소기술 구분	SW명칭	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명
1	1-다	공동구 타당성 평가 프로그램	2020.03.19.	한국건설기술연구원	2020.05.14.	C-2020-015927호	한국건설기술연구원
2	1-라	공동구 경제성 평가 프로그램	2020.03.23	한국건설기술연구원	2020.05.14	C-2020-015928호	한국건설기술연구원
3	1-라	공동구 공사비/공정 프로그램	2020.03.26.	한국건설기술연구원	2020.05.14.	C-2020-015926호	한국건설기술연구원
4	1-사	GeoParDB	2016.11.19	(주)희송지오택	2016.12.21	C-2016-033467호	(주)희송지오택
5	1-사	GCVCaI	2018.01.05	(주)희송지오택	2018.01.16	C-2018-001286호	(주)희송지오택
6	1-사	GCV using GeoParDB	2018.10.15	(주)희송지오택	2018.11.26	C-2018-034641호	(주)희송지오택
7	2-가	셸드TBM 굴진 DB관리 및 분석 프로그램	2019.09.20	한국전력공사 전력연구원	2020.05.28	C-2020-017430호	한국전력공사 전력연구원
8	2-나	셸드 기계식굴착기기 순굴진율 예측 프로그램 ver.1	2018.08.02	송기일, 이항로	2018.08.07	C-2018-019978호	인하대학교
9	2-나	셸드 터널굴착기기 순굴진율 예측 프로그램	2019.12.11	송기일, 이항로	2019.12.16	C-2019-040731호	인하대학교
10	2-아	복합지반용 TBM 커터헤드의 커터배열 및 굴진성능 예측 프로그램	2019.11.16	서울대학교	2019.12.19	C-2019-041681호	서울대학교
11	2-아	트렌칭커터의 커터배열 및 사양설계 프로그램	2019.11.23	서울대학교	2019.12.19	C-2019-041616호	서울대학교
12	3-가	수직구용 외주면 굴착장비 제어 프로그램	2019.11.15	한국과학기술원	2020.01.07	C-2020-001635호	한국과학기술원

4. 시제품 제작

No.	요소기술 구분	시제품명	출시/제작일	제작업체명	설치장소	이용분야
1	2-다	중절(급곡)장치 유압설비	2017.04.	이엠코리아(주)	실대형 검증 센터	건설 및 굴착 장비
2	2-다	EPB Shield TBM(R30m)급곡 장비	2018.05.	이엠코리아(주)	실대형 검증 센터	건설 및 굴착 장비
3	2-마	세그먼트	2019	KC산업	KC산업	성능실험용
4	2-차	셴트TBM용 Probe Drill	2020.04.01.	(주)동아지질	동아지질 이 천공장	셴트TBM
5	2-카	신소재 커터링을 적용한 디스크커터	2019.11.30	진성티이씨	진성티이씨	TBM 자재
6	2-타	소단면 TBM 굴진시험 장비	2018	다올산업	KAIST	성능실험용
7	3-가,나	외주면 굴착장비	2019	다성테크놀로지	한국과학기술 원 내 실대형 성능검증 센 터	연구개발 기 술 성능검증 및 수정 보완
8	3-가,나	외주면 굴착장비 제어시스템	2019	코펜엔지니어링	한국과학기술 원 내 실대형 성능검증 센 터	연구개발 기 술 성능검증 및 수정 보완
9	3-다	암반지반 급속굴착 장비	2019	(주)제영이엔씨	(주)제영이엔씨 연구소	연구개발 기 술 성능검증 및 수정 보완
10	3-라	수직구 하향식 급속성형장치 목업	2018	(주)네오시티	(주)네오시티 본사	하향식 성형 장치의 시각 화 및 목업용
11	3-라	수직구 하향식 급속성형장치	2018	(주)네오시티	(주)네오시티 보은공장	수직구 하향 식 공법에 적 용
12	3-라	수직구-수평터널 연결부 성형장치 부분제작	2019	(주)네오시티	(주)네오시티 보은공장	수직구-수평 터널 연결부
13	3-가(바)	친환경 바이오폴리머 기반 차수재	2020	한국과학기술원	한국과학기술 원 내 실대형 성능검증 센 터	수직구 굴착 면 차수 및 급속고결

5. 현장시험

No.	요소기술 구분	현장시험명	시험일	시험장소	주요내용
1	1-마	현장적용 (안) 설계	2020.03.31	-	터널식 공동구 한계상태설계기준의 기존설계 사례 적용 평가
2	1-바	현장적용 (안) 설계	2020.03.31	-	기존 설계사례에 한계상태설계법을 적용한 세그먼트 라이닝 설계를 수행하여 기존설계와의 경제성 평가
3	1-사	풍화대 강도특성 측정장치 현장검증	2019.10.14	강원도 양양군	편마암 분포지역
4	2-차	샐드TBM용 Probe Drill 성능시험	2020.04.28.	동아지질 이천공장	특수지반에 대한 Probe Drill 천공성능 및 작업반경 이동 테스트
5	3-가,다	수직구 외주면 급속 굴착장치 성능시험	2020.04.22	KAIST 공동구 성능 검증 센터	공동구 신태형 검증 센터 현장 규모 시험
6	3-나	저소음/무진 동 암반지반 급속굴착 장치 성능시험	2020.05	경기도 광주시	저소음/무진동 암반지반 급속 굴착 장비 테스트 베드 적용
7	3-라	하향식 라이닝 급속 성형장치 성능 시험	2020.05	경기도 안성시	수직구 접속부 보강/차수 장치 oo 창고부지 조성 공사
8	3-바	접속부 보강/추수 장치 현장 시험	2020.04.29	충북 보은	하향식 라이닝 급속성형장치 성능 검증 시험

* 현장시험: 개발기술의 보완이나 검증을 위하여 실험현장에 최초로 시험·적용하는 행위

6. 현장적용(시공)

No.	요소기술 구분	발주기관명	시공업체명	적용현장명	공사시작일	공사종료일	공사금액(천원)***
1	2-가	한국전력공사	두산건설(주)	○○-○○지역 전기공급시설 전력구공사 굴진율 예측기법 현장적용	2018.05.18	2022.02.15	59,241,000
2	2-나	한국전력공사	두산건설(주)	○○-○○지역 전기공급시설 전력구공사 굴진율 예측기법 현장적용	2018.05.18	2022.02.15	59,241,000
3	2-다	한국전력공사	두산건설(주)	○○-○○지역 전기공급시설 전력구공사 중절장치 현장적용	2018.05.18	2022.02.15	59,241,000
4	2-카	한국전력공사	두산건설(주)	○○-○○지역 전기공급시설 전력구공사고성능 디스크커터 현장적용	2018.05.18	2022.02.15	59,241,000

** 현장적용(시공): 사업화주체(기업)가 개발기술을 실제 공사현장(수주)에 적용하여 매출이 발생하는 경우

***공사금액: 당해 기술이 적용된 공사의 총공사금액

7. 정책제안

No.	요소기술 구분	구 분	정책명	관련기관 (담당부서)	시행일시	채택내용
1	1-다	정책	서울특별시 지하시설물 통합안전관리 대책	안전총괄실 (안전총괄과)	2019.08.12	지하시설물 효율적 관리를 위한 공동구 확대 검토
2	1-다	정책	공동구 활성화 종합연구	국토교통부	2019.12.28	공동구를 활성화를 위한 타당성 평가시스템 관련 부분 반영
3	1-자, 1-차	정책	공동구 활성화 정책	국토교통부 (도시활력지원과)	2020.05.	국토교통부에서 공동구 활성화를 위한 목적으로 발주한 ‘공동구 활성화를 위한 종합연구’ 연구성과에, 본 연구를 통해 도출한 공동구 계획, 설계, 시공단계 안전관리 업무를 ‘공동구 건설기준 개정(안)’에 반영

8. 설계기준, 시방서, 지침에 반영

No.	요소기술 구분	구 분 (설계기준/시방서/지침)	활용구분 (신규/개선)	설계기준/시방서/지침 명칭	반영일시	반영내용
1	2-가	시방서/지침	개선	한국전력공사 표준시방서 70500 Shield 터널공 / 실무지침서 수록	2020 하반기 (진행 중)	굴진율 관련 산정기법 등
2	2-라	지침	신규	셴드 TBM 급곡구간 시공 가이드라인	2020.05.01.	셴드 TBM 급곡구간 시공 가이드

9. 기술실시계약

No.	요소기술 구분	계약명	실시기업명	계약체결일	기술사용 시작일	기술사용 종료일	정수일자	정수금액 (천원)	계약 유형
1	1-다	도심지 유형별 공동구 설치 타당성 평가 시스템	천마엔지니어링 건축사사무소	2020.05.29	2020.05.29	2021.05.29	2021.05.29	3,000	고정
2	1-라	공동구 경제성 분석 알고리즘	(주)아이엠디	2020.05.29	2020.05.30	2022.05.29	2020.06.30. 2020.07.15	1,000 2,000	-
3	1-마	터널식 공동구 한계상태설계 기준	한국건설기술 연구원	2018.02.28	2020.06.01	(자체기술실 시에 따른 계 속 사용)	-	-	자체기술 실시계약
4	1-사	시추공을 이용한 풍화대 강도특성 측정장치	(주)쎄임코리아	2020.04.07	2020.04.07	2025.04.07	2020.04.07	10,000	고정
5	1-자	도심지 소단면 터널식 공동구 건설단계별 안전위험 요인을 고려한 안전관리기술	한국시설 안전공단	2018.02.28	2020.06.01	(자체기술실 시에 따른 계 속 사용)	-	-	자체기술 실시계약
6	1-차	도심지 소단면 터널식 공동구 시공중 대형재해 대응 방법론	인천대학교	2018.02.28	2020.06.01	(자체기술실 시에 따른 계 속 사용)	-	-	자체기술 실시계약
7	2-가	전기비저항 측정을 통한 지하매설물 탐지방법	(주)에이치비씨	2017.07.12.	2017.07.12.	2021.07.11.	매출발생시	매출발생시 매출액의 3.55%	통상실시 권 허여
8	2-가	전기비저항 측정을 통한 지하매설물 탐지방법	엠포러스	2018.12.26.	2018.12.26.	2022.12.25.	매출발생시	매출발생시 매출액의 2.33%	통상실시 권 허여

No.	요소기술 구분	계약명	실시기업명	계약체결일	기술사용 시작일	기술사용 종료일	징수일자	징수금액 (천원)	계약 유형
9	2-나	TBM 굴진율 예측모델 개발	인하대학교 산학협력단	2018.02.28	2020.06.01	(자체기술실 시에 따른 계 속 사용)	-	-	자체기술 실시계약
10	2-라	급곡선 굴착 모형 시물레이션 장비	호서대학교 산학협력단	2018.02.27	2018.02.27	(자체기술실 시에 따른 계 속 사용)	-	-	자체기술 실시계약
11	2-마	쉴드 TBM 터널용 매크로 합성섬유 보강 콘크리트 조성물 및 이에 의하여 제조된 쉴드 TBM 터널용 콘크리트 세그먼트	KC산업	2020.03.18	2020.03.18	2037.03.03	매출발생시	매출발생시 매출액의 1.5%	고정
12	2-마	쉴드 TBM 터널용 하이브리드 세그먼트	KC산업	2020.03.18	2020.03.18	2037.03.03	매출발생시	매출발생시 매출액의 1.5%	고정
13	2-바	급곡공간 지수재 선정 가이드라인	건국대학교 산학협력단	2018.02.27	2018.01.01	(자체기술실 시에 따른 계 속 사용)	-	-	자체기술 실시계약
14	2-바	세그먼트에 설치하는 지수재 일면 설치기술	(주)터드림이앤씨	2019.11.19.	2019.11.19.	2020.02.29.	-	1,000	고정
15	2-아	특수지반분류 기법 및 특수지반 쉴드 TBM효율적 통과 기법	서울대학교 산학협력단	2018.02.27	2018.02.27	(자체기술실 시에 따른 계 속 사용)	-	-	자체기술 실시계약
16	2-타	소단면 TBM 선단부의 굴진 시험 장비	한국과학기술원	2018.02.27	2018.02.27	(자체기술실 시에 따른 계 속 사용)	-	-	자체기술 실시계약
17	2-타	소단면 TBM 선단부의 굴진 시험 장비	(주)다올산업	2018.03.08.	2018.03.08.	2023.03.08.	매출발생시	1,000, 매출발생시 매출액의 1.5%	통상실시 권 허여
18	3-가	공동구용 수직구 저소음/무진동 급속굴착(1m/ day이상) 시공기술 및 장비개발	한국과학기술원	2018.02.27	2020.05.30	(자체기술실 시에 따른 계 속 사용)	-	-	자체기술 실시계약

No.	요소기술 구분	계약명	실시기업명	계약체결일	기술사용 시작일	기술사용 종료일	징수일자	징수금액 (천원)	계약 유형
19	3-가	바이오폴리머 기반 친환경 차수재 및 차수재 주입방법	한국과학기술원	2018.02.27	2020.05.30	(자체기술실 시에 따른 계 속 사용)	-	-	자체기술 실시계약
20	3-가	수직구용 외주면 굴착장비 제어 프로그램	한국과학기술원	2020.04.28	2020.04.28	2025.12.31	-	7,000	기술이전
21	3-가	수직구 굴착시스템 및 이를 이용한 수직구 시공방법	한국과학기술원	2020.04.28	2020.04.28	2025.12.31	-	20,000	기술이전
22	3-나	저소음/무진동 암반지반 급속 굴착 장비 설 계 기술 이전	(주)제영이앤씨	2020.05.20	2020.05.20	(자체기술 실 시에 따른 계 속 사용)	2020.08 (예정)	23,482 (징수예정)	자체기술 실시계약
23	3-라	공동구용 수직구 하향식 라이닝 현장타설 급속(1m/day) 시공기술 및 장비	(주)네오시티	2020.06.08	2020.06.08.	(자체기술실 시에 따른 계 속 사용)	-	-	자체기술 실시계약
24	3-라	공동구용 수직 구 접속부 보 강/차수 장치 설계 기술 이 전	(주)세니츠코퍼레 이션	2020.04.27	2020.04.27	(자체기술 실 시에 따른 계 속 사용)	2020.07 (예정)	27,590.78 (징수예정)	자체기술 실시계약

제11장. 기타 사항

해당사항 없음

제12장. 참고 문헌

- [1] 건설교통부 (2006). 공동구 활성화방안 연구(1단계).
- [2] 건설교통부 (2008). 공동구 활성화방안 연구(2단계).
- [3] 건축 및 토목 공학사전. (1994). 한국사전연구출판사, p. 1401.
- [4] 고문성. (2014). 대규모 단층대 분포특성에 따른 터널보강공법 연구. 석사학위 논문, 우송대학교 녹색철도대학원, pp. 1-72.
- [5] 고성일, 황창희, 추석연, 신현강, 정진일, 김용만, & 이상덕 (2010) 쉴드 TBM 축소 모형 실험을 통한 연약지반에서의 토피고 조건별 막장입 관리 및 지표로의 이수분출 가능성 평가에 관한 연구. KTA International Symposium on Mechanized tunnelling technology, Seoul, Korea.
- [6] 공진영, 신영완, 황의성, & 천병식. (2009). 원형수직구에 설치된 강성벽체에 작용하는 토압산정방법. 한국지반공학회논문집, 25(1), 21-29.
- [7] 박준환, 박형근. (2009). Shield TBM공법 초기 굴진 자료 분석을 통한 공기지연 요소 분석에 관한 연구-. 대한토목학회 학술발표 및 세미나 자료집, Vol.35, pp. 3551-3554
- [8] 국가기술표준원. (1992). KS F 2302(대한민국).
- [9] 국토교통부 (2010). 공동구 설계기준.
- [10] 국토교통부 (2010). 공동구 표준 시방서.
- [11] 국토교통부 (2012). 콘크리트구조기준.
- [12] 국토교통부 (2014). 공동구 기술기획 보고서.
- [13] 국토교통부 (2014). 공동구 설치 및 관리지침.
- [14] 국토교통부 (2016). 건설공사 안전관리 업무수행 지침.
- [15] 국토교통부 (2016). 도로교설계기준(한계상태설계법).
- [16] 국토교통부 (2016). 터널설계기준.
- [17] 국토교통부 (2017). 설계 안전성 검토 업무 매뉴얼.
- [18] 국토교통부. 건설안전정보시스템(COSMIS), <http://www.cosmis.or.kr/>.
- [19] 국토교통성 긴키지방정비국 (2012). 토목설계편람.
- [20] 국토교통성 중부지방정비국 (2005). 전선공동구 설계설명서.
- [21] 국토교통성 중부지방정비국 (2014). 도로설계요령 설계편.
- [22] 국토해양부 (2008). 공동구 설치 및 관리지침.
- [23] 국토해양부 (2010). 공동구 설계기준.
- [24] 국토해양부 (2011). 교통시설 투자평가지침(도로부문) 개정방안 연구.
- [25] 국토해양부. (2011). 도로설계편람-터널편. p. 1118.
- [26] 기획예산처 (2006). 공동구 활성화방안 검토.
- [27] 김상환, 장인석, & 김지태. (2012) 축소모형실험을 통한 쉴드 TBM 커터비트의 절삭력 평가를 위한 기초 연구. 한국터널지하공간학회논문집, 제 14권 제 3호, pp 277-292
- [28] 김성수. (2001). 터널 최종 변위량 예측에 관한 연구. 석사학위 논문, 인하대학교, p. 58.
- [29] 김영근. (2017). TBM 장비선정의 핵심이슈와 기술적 딜레마-EPB Vs. Slurry-. 한국터

널지하공간학회 기술자료집, Vol.19, No.2, pp. 39-51

- [30] 김옥영, 노승환, 노상림. (2015). 싱가포르 포트캐닝 전석층에 적용된 EPBM의 설계 및 시공. 한국터널지하공간학회 학술발표 및 세미나 자료집, Vol.25, No.5, pp. 417-422
- [31] 김주완. (2013). LW 그라우팅의 주입효과 사례연구. 석사학위 논문, 부경대학교 대학원, p. 101.
- [32] 김택곤, 이재국. (2016). 인천공항 연결철도 건설공사 쉴드TBM 시공관리 적정성 검토. 한국터널지하공간학회 연구보고서, pp. 39-51
- [33] 노승용 (2006). 알기 쉬운 연구방법론 7: 델파이기법(Delphi technique) : 전문적 통찰로 미래예측하기, 국토연구원, (pp. 53-62).
- [34] 대만 내무부 (2013). 공동관로 설계표준.
- [35] (주)날리지웍스. (2020). 도심지 소단면 터널식 공동구 설계 및 시공 핵심기술 개발의 경제성 분석 연구보고서
- [36] (주)동아지질 터널사업부 (2018). SHIELD TBM 시공 GUIDE. (주)동아지질 기술문서, Ver. 1, pp. 1-448
- [37] (주)동아지질 터널사업부. D2.95m SLURRY TBM Technical data-RASA. (주)동아지질 기술문서
- [38] (주)동아지질 터널사업부. D3.15m SLURRY TBM Technical data-RASA. (주)동아지질 기술문서
- [39] (주)동아지질 터널사업부. D3.50m SLURRY TBM Technical data-RASA. (주)동아지질 기술문서
- [40] (주)동아지질 터널사업부. D3.55m E.P.B TBM Technical data-Kawasaki. (주)동아지질 기술문서
- [41] (주)동아지질 터널사업부. D4.34m E.P.B TBM Technical data-Kawasaki. (주)동아지질 기술문서
- [42] (주)동아지질 터널사업부. D7.91m E.P.B TBM Technical data-Kawasaki. (주)동아지질 기술문서
- [43] (주)동아지질 터널사업부. S-962 SLURRY TBM Technical data-Herrenknecht. (주)동아지질 기술문서
- [44] 마카오 토지공무운송국 (2012). 도시기반시설의 지하 공동구 구축에 관한 연구.
- [45] 배근우 (2017). 해저터널 적정 공사기간 예측을 위한 표준공정관리 체계 연구, 한국건설관리학회 논문집, 18(4), 36-47.
- [46] 사공명, 정치광, 문준배, 김재영, 윤도식, 유명한. (2015). 개정 TBM 터널 표준시방서 해설 연구. 한국터널지하공간학회 학술발표 및 세미나 자료집, Vol.17, No.4, pp. 415-428
- [47] 서문복. (2016). 단주기 진동그라우팅의 지반보강 효과. 박사학위 논문, 한국교통대학교 일반대학원, p. 130.
- [48] 서울특별시(2014). 서울시 공동구 설치 타당성조사 및 기본계획 수립 연구.
- [49] 서울특별시(2014). 제1차 서울시 공동구 설치 기본계획(안).
- [50] 성주현, 윤준웅 (2017). TBM 터널 굴착 안정성에 영향을 미치는 위험요소 도출 및 중
-

요도 결정, 한국터널지하공간학회논문집, 19(6), 973-983.

- [51] 손용민. (2017). 소규모 단층파쇄대에서 터널굴착중 지표면 함몰구간의 굴착면 붕락거동 분석. 박사학위 논문, 목포해양대학교 대학원 해양시스템공학과, p. 146.
- [52] 송규진, 윤현석, 서용석. (2016). 터널 굴진면 수평변위를 이용한 굴진면 전방의 단층대 예측. 지질공학회지, Vol. 26, No. 2, pp. 187-196.
- [53] 신영완, 박태수, & 이인기. (2005). 원형수직구에 작용하는 토압산정 및 지표침하 예측방법에 관한 연구. 터널 시공기술 향상 대토론회, 151-167.
- [54] 안전보건공단 (2014). 풍속에 따른 크레인 작업중지 기준에 관한 연구.
- [55] 안전보건공단 (2017). 위험성평가 해설지침서.
- [56] 오태민 & 조계춘 (2012). “연마제 워터젯 암석절삭을 위한 결합 노즐의 기하학적 변수 영향”, 한국터널지하공간학회 논문집, Vol.14, No.5, pp. 517-528.
- [57] 오태민 (2012). “연마제 워터젯을 이용한 암반 굴착”, 공학박사학위논문, KAIST
- [58] 오태민, 박의섭, 천대성, 조계춘, 주건욱 (2015), “암석물성이 워터젯 암석절삭 성능에 미치는 영향고찰”, 한국터널지하공간학회 논문집, 제17권, 제5호, pp. 533-551.
- [59] 오태민, 조계춘 (2010), “화강암에 대한 워터젯 파쇄메커니즘에 관한연구” 한국지반공학회 2010 봄 학술발표회, pp.643-648.
- [60] 오태민, 홍은수, 조계춘 (2009), “워터젯을 이용한 화강암 천공과 절삭 특성에 관한 연구” 한국지반공학회 2009 가을 학술발표회, pp.1338-1345..
- [61] 옥용관, 임종철, & 권정근. (2008). 실내모형실험을 통한 히빙 이론에 관한 연구. 한국지반공학회 추계 학술대회, 2008(단일호), pp. 1144-1156.
- [62] 유광호, 박치면. (2016). 해저 연약 퇴적층 지반 쉼드 TBM 위험요인 평가 및 장비 침하에 관한 연구. 한국터널지하공간학회 학술발표 및 세미나 자료집, Vol.19, No.4, pp. 355-364
- [63] 윤현석, 문성우, 송규진, 서용석, 김지수, 무상백. (2014). 터널 굴착 중 측정된 천단변위를 이용한 단층대의 변형계수 산정. 대한지질공학회 학술저널, Vol. 24, No. 2, pp. 227-235.
- [64] 윤현석, 서용석. (2016). 터널 굴진면 최대 수평변위의 변화 양상에 따른 단층 자세 분석. 대한지질공학회, Vol. 26, No. 3, pp. 393-401.
- [65] 이승률, 양영순 (2010). 합의된 한계하중에 기반한 목표신뢰도지수 제시방안 연구, 2010년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, 847-853
- [66] 이시욱. (2008). 시뮬레이션 기반 도심지 지하철 터널 공사 계획 모델 개발 - NATM 공법을 대상으로. 석사학위 논문, 인하대학교, p. 61.
- [67] 일본도로협회 (1986). 공동구 설계지침.
- [68] 일본철도총합기술연구소 (2003). 철도구조물등설계표준·동해설(쉴드터널).
- [69] 일본토목학회 (2006). 터널표준시방서 개착공법편·동해설.
- [70] 일본토목학회 (2006). 터널표준시방서 산악공법편·동해설.
- [71] 일본토목학회 (2006). 터널표준시방서 쉼드공법편·동해설.
- [72] 임종철, 홍석우. (2001). 부산지하철 공사현장의 호박돌층 판정사례. 한국터널지하공간학
-

-
- 회, Vol. 3, No. 3, pp. 50-57.
- [73] 임현교 (2012). 시스템 안전공학, 한솔아카데미.
- [74] 장수호, 박병광, 이철호, 강태호, 배규진, 최순욱. (2017). TBM 제작사양을 추정하기 위한 데이터베이스의 구축과 통계분석. 한국터널지하공간학회 학술발표 및 세미나 자료집, Vol.27, No.5, pp. 271-281
- [75] 전기찬, 김도형, 방규민, 김동현, 김택곤. (2009). 쉘드TBM 터널 설계시 주요 고려사항에 대한 사례연구: 이스탄불해협 도로터널 횡단 프로젝트. (구)한국터널공학회 학술발표 및 세미나 자료집, Vol.10, pp. 1-13
- [76] 정진철, 이종범, 이현민, 공혜란 (2012). 발명교육 활성화 지수 개발 및 적용, 한국실과교육학회지, 25(2), 129-150.
- [77] 정호영, 장난, 전석원. (2018). 특수지반에서 쉘드TBM의 시공을 위한 기술적 고찰. 한국암반공학회, Vol. 28, No. 1, pp. 1-24.
- [78] 조원섭, 송기일, 김경열. (2014). 단층파쇄대 규모 및 조우 조건에 따른 전력구 쉘드 TBM 터널의 거동 특성 분석. 한국터널지하공간학회, Vol. 16, No. 4, pp. 403-415.
- [79] 조원섭. (2016). 쉘드 TBM 전력구 터널 거동에 대한 수치해석적 연구. 석사학위 논문, 인하대학교 일반대학원, p. 104.
- [80] 주건욱, 오태민, 조계춘 (2014), “터널굴착용 투입형 연마재 워터젯 시스템의 연마재 투입량과 유동성에 미치는 영향 인자”, 한국터널지하공간학회 논문집, 제16권, 제4호, pp. 417-430.
- [81] 중국 국가표준 (2015). 도심지 공동구 설계표준 GB50838-2015.
- [82] 천병식, 기정서, 강태희, 곽운형, 변요셉 (2014). 암반층에서 쉘드 TBM 터널 세그먼트의 작용하중 산정방법에 관한 연구, 한국지반환경공학회 논문집, 15(5), 13-21.
- [83] 한국개발연구원 (2008). 도로·철도 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완 연구(제5판).
- [84] 한국상하수도협회 (2010). 상수도시설기준.
- [85] 한국수자원공사 (2004). 토목공사 설계지침.
- [86] 한국시설안전공단(2015). 한계상태설계법을 고려한 교량의 안전성 평가기법 개선방안 연구.
- [87] 한국전력공사 (2004). 배전(지중) 설계기준.
- [88] 한국전력공사 (2004). 전력구 부대설비 시설기준.
- [89] 한국전력공사 (2009). 지중송전 설계기준.
- [90] (구)한국터널공학회. (2001). 쉘드TBM 지침서(Recommendation and Guideline for Shield Tunnel Boring Machines). 두산건설주식회사 연구보고서. pp. 147-173
- [91] 한국터널지하공간학회(2008). 터널 기계화시공 설계편, 씨아이알.
- [92] 한국토지주택공사 (2016). 1354호 설계지침(토목).
- [93] AASHTO, L. (1996). Standard specifications for highway bridges. Officials, Sixteenth Edition, American Association of State Highway and Transportation Washington, DC.
- [94] AASHTO, L. (2017). Road Tunnel Design and Construction Guide Specifications,
-

American Association of State Highway and Transportation Washington, DC.

- [95] Aguarón, J., & Moreno-Jiménez, J.M. (2000). Local stability intervals in the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 125(1), 113-132.
- [96] Aksoy, C.O. (2008). Chemical injection application at tunnel service shaft to prevent ground settlement induced by groundwater drainage: a case study. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(3), 376-383.
- [97] Alonso, J. A., & Lamata, M. T. (2006). Consistency in the analytic hierarchy process: a new approach. *International journal of uncertainty, fuzziness and knowledge-based systems*, 14(04), 445-459.
- [98] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (1988). *Manual on Subsurface Investigations*, Washington, D.C.
- [99] Amoun, S., Sharifzadeh, M., Shahriar, K., Rostami, J., & Azali, S.T. (2017). Evaluation of tool wear in EPB tunneling of Tehran Metro, Line 7 Expansion. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 61, 233-246.
- [100] Arai, Y., Kusakabe, O., Murata, O., & Konishi, S. (2008). A numerical study on ground displacement and stress during and after the installation of deep circular diaphragm walls and soil excavation. *Computers and Geotechnics*, 35(5), 791-807.
- [101] ARUP (2017). *Tunnel Lining Design Guide*, an in-house design guide.
- [102] ASTM (2011). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)* (D2487-11)
- [103] Baecher, G. B., & Christian, J. T. (2005). "Reliability and statistics in geotechnical engineering". John Wiley & Sons.
- [104] Barla, G. (2001). *Tunnelling Under Squeezing Rock Conditions*. Eurosummer-School in Tunnel Mechanics, Innsbruck, Logos Verlag, Berlin, 169-268.
- [105] Barla, G., & Pelizza, S. (2000). *TBM tunnelling in difficult ground conditions*. GeoEng2000 - An International Conference on Geotechnical & Geological Engineering, Melbourne, Australia.
- [106] Barton, N.R. (2000). "TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock", Rotterdam: Balkema.
- [107] Barton, N.R., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 6, 189-236.
- [108] Barzegari, G., Uromeihy, A., & Zhao, J. (2014). EPB tunneling challenges in bouldery ground: a new experience on the Tabriz metro line 1. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73, 429-440.
- [109] Becker, D.E. (2006). Limit states design based codes for geotechnical aspects of foundations in Canada. In *New Generation Design Codes For Geotechnical Engineering Practice—Taipei 2006: (With CD-ROM)*.
- [110] Bieniawski, Z.T. (1976). Rock mass classifications in rock engineering. *Proceedings*

Symposium on Exploration for Rock Engineering, Rotterdam, 97–106.

- [111] Bilgin, N., & Algan, M. (2012). The performance of a TBM in a squeezing ground at Uluabat, Turkey. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 32, 58–65.
 - [112] Bilgin, N., & Ates, U. (2016). Probe Drilling Ahead of Two TBMs in Difficult Ground Conditions in Turkey. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(7), 2763–2772.
 - [113] Bjerrum, L., & Eide, O. (1956). Stability of strutted excavations in clay. *Geotechnique*, 6(1), 32–47.
 - [114] British Tunnelling Society. (2004). *Tunnel lining design guide*. Thomas Telford.
 - [115] Broere, W. (2016). Urban underground space: Solving the problems of today's cities. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 55, 4–17.
 - [116] BTS (2010). *Specification for tunneling*, Third edition.
 - [117] Casagrande, A., & Fadum, R.E. (1900). Notes on soil testing for engineering purposes.
 - [118] CEN (2011). Eurocode, European Standard.
 - [119] Center for utility tunnel (2017). Development of core technology for urban small-diameter utility tunnel construction.
 - [120] Center for utility tunnel (2018). Development of core technology for urban small-diameter utility tunnel construction.
 - [121] Chenggang, B., & Xibao, R. (1998). Principle of the Geotechnical Centrifuge Model Test [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2.
 - [122] CSA (2006). Canadian Highway Bridge Design Code. CAN/CSA-S6-06.
 - [123] Delisio, A., & Zhao, J. (2014). A new model for TBM performance prediction in blocky rock conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 43, 440–452.
 - [124] Delisio, A., Zhao, J., & Einstein, H.H. (2013). Analysis and prediction of TBM performance in blocky rock conditions at the Lötshberg Base Tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 33, 131–142.
 - [125] Diponio, M.A. (2016). Personal communication.
 - [126] Dong, A., Ma, G., Gong, Q.M., & Zhao, J. (2006). Numerical simulation on rock cutter performance in mixed ground. *Geoshanghai 2006*, 199–204.
 - [127] Duddeck, H., & Erdmann, J. (1985). Structural design models for tunnels in soft soil. *Underground Space*; (United States), 9.
 - [128] EURO CODE (2002). Eurocode 0 : Basis of structural design.
 - [129] EURO CODE (2002). Eurocode 1: Action on structures.
 - [130] EURO CODE (2004). Eurocode 2 : Design of concrete structures.
 - [131] EURO CODE (2005). Eurocode 3: Design of steel structures.
 - [132] EURO CODE (2013). Eurocode7: Geotechnical Design.
 - [133] European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems (1996). *European Specification for Sprayed Concrete*.
-

-
- [134] European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems (1996). Guidelines for testing fire protection systems for tunnels (draft).
- [135] European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems (1999). Execution of Spraying (revision of Section 8 of European Specification for Sprayed Concrete).
- [136] European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems (1999). Guidelines to the Sprayed Concrete Specification.
- [137] European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems (2002). European Specification for Sprayed Concrete: Checklist for Specifier and Contractors.
- [138] European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems (2005). Specification and Guidelines for the use of specialist products for Mechanized Tunnelling (TBM).
- [139] Fang, Y., Deng, R.Y., Walton, G., & Wang, S.M. (2017). Performance of slurry TBM tunnelling in sandy cobble ground - A case study in Lanzhou. International Conference on Tunnel Boring Machines in Difficult Grounds (TBM DiGs 2017), Wuhan, China.
- [140] Farmer, I.W., & Attewell, P.B. (1965). Rock Penetration by High Velocity Water Jets. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 2(2), 135-153.
- [141] FHWA (2001). Load and Resistance Factor Design(LRFD) of Highway Bridge Substructures, US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C Publication No. FHWA HI-98-032.
- [142] FHWA (2004). Road Tunnel Design Guidelines, US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C Publication No. FHWA IF-05-023.
- [143] FHWA (2009). Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels Civil Elements.
- [144] Filbà, M., Salvany, J.M., Jubany, J., & Carrasco, L. (2016). Tunnel boring machine collision with an ancient boulder beach during the excavation of the Barcelona city subway L10 line: A case of adverse geology and resulting engineering solutions. Engineering Geology, 200, 31-46.
- [145] Germaine, J.T., & Ladd, C.C. (1988). State-of-the-art paper: Triaxial testing of saturated cohesive soils. In Advanced triaxial testing of soil and rock. ASTM International.
- [146] Gharahbagh, E.A., Rostami, J., & Palomino, A.M. (2011). New soil abrasion testing method for soft ground tunneling applications. Tunnelling and Underground Space Technology, 26, 604-613.
- [147] Goh, A.T. (1994). Seismic liquefaction potential assessed by neural networks.
-

Journal of Geotechnical engineering, 120(9), 1467–1480.

- [148] Goh, A.T.C. (2017). Deterministic and reliability assessment of basal heave stability for braced excavations with jet grout base slab. *Engineering Geology*, 218, 63–69.
 - [149] Golden, B.L., & Wang, Q. (1989). An alternate measure of consistency. In *The Analytic Hierarchy Process* (68–81). Springer, Berlin, Heidelberg.
 - [150] Gong, Q.M., Liu, Q.S., & Zhang, Q.B. (2016). Tunnel boring machines (TBMs) in difficult grounds, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 57, 1–3.
 - [151] Gong, Q.M., Yin, L.J., & She, Q.R. (2013). TBM tunneling in marble rock masses with high in situ stress and large groundwater inflow: A case study in China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 72(2), 163–172.
 - [152] Goss, C.M. (2002). Predicting Boulder Cutting in Soft Ground Tunneling. *Proceedings of North American Tunneling 2002*, Rotterdam: Balkema, 37–46.
 - [153] Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., & Xu, S. (2007). "Mechanized Tunnelling in Urban Areas: Design methodology and construction control". Taylor & Francis Group, London.
 - [154] Hamidi, J.K., Shahriar, K., Rezai, B., & Rostami, J. (2010). Performance prediction of hard rock TBM using Rock Mass Rating (RMR) system. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(4), 333–345.
 - [155] Hassanpour, J., Rostami, J., & Zhao, J. (2011). A new hard rock TBM performance prediction model for project planning. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(5), 595–603.
 - [156] Hassanpour, J., Rostami, J., Khamsehchiyan, M., & Bruland, A. (2009). Developing new equations for TBM performance prediction in carbonate argillaceous rocks: a case history of Nowsood Water conveyance tunnel. *Geomechanics and Geoengineering*, 4(4), 287–297.
 - [157] Hassanpour, J., Rostami, J., Khamsehchiyan, M., Bruland, A., & Tavakoli, H.R. (2010). TBM performance Analysis in Pyroclastic Rocks: A Case History of Karaj Water Conveyance Tunnel. *Geomechanics and Geoengineering*, 43(4), 427–445.
 - [158] Heuer, R.E. (1974). Important parameters in soft ground tunneling, proceedings of specialty conference on subsurface exploration for underground excavation and heavy construction. ASCE, New York.
 - [159] Hoek, E., & Brown, E.T. (1998). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34, 1165–1186.
 - [160] Holtz, R.D., & Kovacs, W.D. (1981). *An introduction to geotechnical engineering* (No. Monograph).
 - [161] Hong, E.S., Cho, G.C., Baak, S., & Jun, H.W. (2016). Rapid construction technique development for vertical shafts of utility tunnels. KTA 2016 Annual Spring Conference, Seoul, Korea.
-

-
- [162] Hunt, D.V.L., Nash D., & Rogers, C.D.F. (2014). Sustainable utility placement via Multi-Utility Tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 39, 15–26.
- [163] Hunt, S.W. (2017). Tunneling in cobbles and boulders, Breakthroughs in Tunneling, Short Course, Colorado School of Mines, August 14–16, Chicago, USA.
- [164] Hunt, S.W., & Del Nero, D.E. (2011). Tunneling in cobbles and boulders, Breakthroughs in Tunneling, Short Course, Colorado School of Mines, September 19–21, Colorado, USA.
- [165] ISO 2394, I.S.O. (1998). General principles on reliability for structures. Zurich: ISO.
- [166] Japan Society of Civil Engineers (JSCE). (2007). Standard specifications for tunneling: Shield tunnel. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers.
- [167] Japan Society of Civil Engineers (JSCE). (2010). Segment Design (Allowable Stress Design & Limit State Design. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers.
- [168] Jee, W.W., & Ha, S-G. (2007). Feasible Boulder treatment methods for soft ground shielded TBM. *Proceedings of World Tunneling Congress 2007*, Taylor & Francis Group, London, 217–222.
- [169] JSCE (2004) Geo-code21.
- [170] Kang, Y.K., & Choi, I.C. (2015). Economic Feasibility of Common Utility Tunnel based on Cost-Benefit Analysis. *Journal of Korean Society of Safety*, 30(5), 29–36.
- [171] KDS (2016). Design Standards of Highway Bridge.
- [172] Keane, R.D., & Adrian, R.J. (1992). Theory of cross-correlation analysis of PIV images. *Applied scientific research*, 49(3), 191–215.
- [173] Kemper, W. D., & Rosenau, R. C. (1984). Soil cohesion as affected by time and water content. *Soil Science Society of America Journal*, 48(5), 1001–1006.
- [174] KICT (2010). TBM Technology Development for Mechanized and Automated Tunnel Construction. Research Report, Korea Institute of Construction Technology.
- [175] Kieffer, D.S., Leelasukseree, C., & Mustoe, G.G.W. (2008). Disc cutter performance in boulder laden ground. *Proceedings of North American Tunneling 2008*, 129–136.
- [176] Kim, D.H., Lee, K.H., & Lee, I.M. (2011). Seepage-induced behavior of a circular vertical shaft. *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, 13(6), 431–450.
- [177] Kim, Y.K. (2017). Key issue and technical dilemma of selection of TBM type - EPB vs. Slurry. *Magazine of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, 19(2), 39–51.
- [178] Kollé, J.J. (1999). A comparison of water jet, abrasive jet and rotary diamond drilling in hard rock. *Tempress Technologies Inc*, 1–8.
- [179] Korea Occupational Safety & Health Agency (2011). Technical Guidance on Cause Consequence Analysis, KOSHA GUIDE X - 43 - 2011.
- [180] Korean Tunnelling and Underground Space Association (2008). Mechanized
-

Tunnelling-Design, CIR, Seoul.

- [181] Koumoto, T., & Houlsby, G.T. (2001). Theory and practice of the fall cone test. *Géotechnique*, 51(8), 701–712.
- [182] Kovári, K., & Ramoni, M. (2006). Urban tunnelling in soft ground using TBMs. International Conference and Exhibition on Tunnelling and Trenchless Technology: Tunnelling and trenchless technology in the 21st century, Subang Jaya-Selangor, Malaysia, 17–31.
- [183] Krumbein, W.C., & Esther, A. (1937). The Sediments of Barataria Bay. *Journal of Sedimentary Petrology*, 7(1).
- [184] Lane, E.F., & Verdini, W.A. (1989). A consistency test for AHP decision makers. *Decision Sciences*, 20(3), 575–590.
- [185] Lee, K.H., Seo, H.J., Park, J.J., Park, J.H., & Lee, I.M. (2016). A probabilistic assessment of ground condition prediction ahead of TBM tunnels combining each geophysical prediction method. *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, 18(3), 257–272.
- [186] Lee, S.D., Jeong, H.Y., & Jeon, S. (2012). Determination of rock abrasiveness using Cerchar abrasiveness test. *Tunnel and Underground Space*, 22(4), 284–295.
- [187] Lee, Y.J., Lee, H.S., Chang, S.B., & Kim, W.S. (2010). A Study on the Design of Shield Tunnel Segment Lining Structure. *Journal of Yooshin Technology*, 17, 106–116.
- [188] Leonhardt, F. (1964). *Prestressed concrete: Design and construction*. W. Ernst.
- [189] Li, S.C., Liu, B., Xu, X.J., Nie, L.C., Liu, Z.Y., Song, J., Sun, H.F., Chen, L., & Fan, K.R. (2017). An overview of ahead geological prospecting in tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 63, 69–94.
- [190] Lutenecker, A.J. (1987). Suggested method for performing the borehole shear test. *Geotechnical Testing Journal*, 10(1), 19–25.
- [191] Lutenecker, A.J., & Hallberg, G.R. (1981). Borehole shear test in geotechnical investigations. In *Laboratory shear strength of soil*. ASTM International.
- [192] Mair, R.J., Gunn, M.J., & O'Reilly, M.P. (1982). Ground movement around shallow tunnels in soft clay. *Tunnels & Tunnelling International*, 14(5)
- [193] McFeat-Smith, I. (2016). TBM tunnelling in extreme geological conditions: from mixed ground conditions in Asia's urban areas to challenges in the Himalayas. International Conference on Tunnel Boring Machines in Difficult Grounds (TBM DiGs 2016), Istanbul, Turkey.
- [194] National Fire Protection Association. (2014). *Standard for road, tunnels, bridges, and other limited access highways (NFPA 502)*.
- [195] NCHRP (1998). *Manual for bridge rating through load testing*. Transportation Research Board, National Research Council.
- [196] Nebeker, E.B., & Rodriguez, S.E. (1976). *Percussive waterjets for rock cutting*. 3rd

Int. Symp. on jet cutting technology, paper B1

- [197] No, W.G., & International Tunnelling Association. (2000). Guidelines for the design of shield tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15(3), 303-331.
- [198] Noble, E.E., & Sanchez, P.P. (1993). A note on the information content of a consistent pairwise comparison judgment matrix of an AHP decision maker. *Theory and Decision*, 34(2), 99-108.
- [199] Nowak, A.S., & Collins, K.R. (2012). "Reliability of structures". CRC Press.
- [200] Ovesen, N.K. (1995). Eurocode 7 for geotechnical design. In *Proceedings Bengt B. Broms Symposium on Geotechnical Engineering* (pp. 333-360).
- [201] Paltrinieri, E., Sandrone, F., & Zhao, J. (2016). Analysis and estimation of gripper TBM performances in highly fractured and faulted rocks". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 52, 44-61.
- [202] PAS 8810 (2016). Tunnel Design - Design of concrete segmental tunnel linings - Code of Practice, The British Standards Institution.
- [203] Penzien, J. (2000). Seismically induced racking of tunnel linings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 29(5), 683-691.
- [204] Phoon, K.K., & Kulhawy, F.H. (1999). Characterization of geotechnical variability. *Canadian geotechnical journal*, 36(4), 612-624.
- [205] Ramoni, M., & Anagnostou, G. (2010). Tunnel boring machines under squeezing conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(2), 139-157.
- [206] Ringen, A. (2016). Compaction and Jet. Grouting, Breakthroughs in Tunneling Short Course, University of Colorado, September 14, Colorado, USA.
- [207] Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, 48(1), 9-26.
- [208] Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences*, 1(1), 83-98.
- [209] Saaty, T.L. (1980). "The Analytic Hierarchy Process." New york, McGraw-Hill.
- [210] Sandell, T. (2017). Rondout West Branch Bypass Tunnel Advancements in Mechanized Excavation A TBM Boring in hard rock against high water pressure and high water inflows beneath the Hudson River in New York. *Proceedings of ITA-AITES World Tunnel Congress 2013 (WTC 2013)*, Bergen, Norway.
- [211] Scarano, F., & Riethmuller, M. L. (2000). Advances in iterative multigrid PIV image processing. *Experiments in Fluids*, 29, S051-S060.
- [212] Schneider, H.R. (1997). Definition and determination of characteristic soil properties. Contribution to discussion session 2.3. *Proc. XII ICSMGE*, Hamburg, Balkem.
- [213] Shirlaw, J.N. (2015). Pressurized TBM Tunnelling in mixed face conditions resulting from tropical weathering of igneous Rock. *International Conference on Tunnel Boring Machines in Difficult Grounds (TBM DiGs 2015)*, Singapore.
-

-
- [214] Shirlaw, J.N. (2016). Pressurised TBM tunnelling in mixed face conditions resulting from tropical weathering of igneous rock. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 57, 225-240.
 - [215] Singh, M.M., & Hartman, H.L. (1961). Hypothesis for the Mechanism of Rock Failure under impact. 4th Symp. on Rock Mechanics, Pennsylvania State University, PA, 221-228.
 - [216] Steingrímsson, J.H., Grøv, E., & Nilsen, B. (2002). The significance of mixed-face conditions for TBM performance. *World Tunnelling*, 15, 435-441.
 - [217] Student. (1908). The probable error of a mean. *Biometrika*, 1-25.
 - [218] Summers, D.A. (1995). "Waterjetting Technology", E & FNSpon, An imprint of Chapman & Hall.
 - [219] Tan, Y., & Wang, D. (2013). Characteristics of a large-scale deep foundation pit excavated by the central-island technique in Shanghai soft clay. I: Bottom-up construction of the central cylindrical shaft. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(11), 1875-1893.
 - [220] Terzaghi, K. (1946). Rock defects and loads on tunnel supports (No. BOOK). Harvard Univ..
 - [221] Terzaghi, K. (1950). Chapter 11: Geologic aspects of soft ground tunneling. *Applied sedimentation*. Wiley, New York.
 - [222] Terzaghi, K., & Peck, R.B. (1967). Soil mechanics in engineering practice (No. 624.151 T47 1967).
 - [223] Thewes, M. (2004). Schildvortrieb mit Flüssigkeits-oder Erddruckstützung in Bereichen mit Gemischter Ortsbrust aus Fels und Lockergestein *Geotechnik* 27(2), 214-219.
 - [224] Thewes, M., & Hollmann, F. (2015). Clogging of TBMs in clay soils and clay-rich rock. *International Conference on Tunnel Boring Machines in Difficult Grounds (TBM DiGs 2015)*, Singapore.
 - [225] Tóth, Á., Gong, Q.M., & Zhao, J. (2013). Case studies of TBM tunneling performance in rock - soil interface mixed ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38, 140-150.
 - [226] Tummala, V.R., & Wan, Y.W. (1994). On the mean random inconsistency index of analytic hierarchy process (AHP). *Computers & industrial engineering*, 27(1-4), 401-404.
 - [227] Tunnel Business Magazine (2016). TBM Tunneling the Chengdu Metro", Benjamin Media, Inc. <http://tunnelingonline.com/tbm-tunneling-chengdu-metro/>
 - [228] Tunnel Market Analysis, International Tunneling and Underground Space Association(ITA), (2014)
 - [229] Vergara, I.M., & Saroglou, C. (2017). Prediction of TBM performance in mixed-face
-

-
- ground conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 69, 116–124.
- [230] Williams, O. (1997). *Engineering and design-tunnels and shafts in rock*. US Army Corps of Engineers, Washington, DC, 20314-1000.
- [231] Wood, A.M. (1975). The circular tunnel in elastic ground. *Geotechnique*, 25(1), 115–127.
- [232] Yagiz, S. (2006). TBM performance prediction based on rock properties. *Proceedings of Multiphysics Coupling and Long Term Behavior in Rock Mechanics, EUROCK*, 6, 663–670.
- [233] Yagiz, S. (2008). Utilizing rock mass properties for predicting TBM performance in hard rock condition. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(3), 326–339.
- [234] Yagiz, S., & Karahan, H. (2011). Prediction of hard rock TBM penetration rate using particle swarm optimization. *Rock Mechanics and Mining Science*, 48(3), 427–433.
- [235] Yamamoto, S. (1977). The development of geo graphical study of Tokyo Bunrika University and Tokyo Kyoiku University. *Sci. Rept. Tokyo Kyoiku Univ. Sec. C*, 13–126.
- [236] Yoo, C.S., & Jeon, H.M. (2012). A comparative study on methods for shield tunnel segment lining sectional forces. *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, 14(3), 159–181.
- [237] Zarei, H.R, Sharifzadeh, M., & Uromyehic, A. (2011). Gas ground risks and geological investigations for TBM tunneling in Iran. *First Asian and 9th Iranian Tunneling symposium*, Tehran, Iran.
- [238] Zhang, C.S., Liu, N., & Chu, W.J. (2016). Key technologies and risk management of deep tunnel construction at Jinping II hydropower station. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(4), 499–512.
- [239] Zhao, J., & Gong, Q.M. (2006). *Rock Mechanics and Excavation by Tunnel Boring Machine - issues and challenges*, *Proceedings of the ISRM International Symposium 2006 and the 4th Asian Rock Mechanics Symposium*, Singapore.
- [240] Zhao, J., & Gong, Q.M. (2015). TBM tunneling under adverse geological conditions - An overview, *Keynote lecture, International Conference on Tunnel Boring Machines in Difficult Grounds (TBM DiGs 2015)*, Singapore.
- [241] Zhao, J., Gong, Q.M., & Eisensten, Z. (2007). Tunnelling through a frequently changing and mixed ground: A case history in Singapore, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22, 388–400.
-

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 건설기술연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

비매품/무료

