

해저시설물 차폐 기술개발



신희순

한국지질자원연구원
영년직연구원

1. 서언

우리나라는 현재 협소한 국토 면적 99,274km²에 인구 밀도는 490명/km²로 방글라데시(1,142명/km²), 대만(637명/km²)에 이어 3위이다. 선진국(23명/km²)의 20배가 넘고 개도국(68명/km²)보다도 7배가 넘는다. 또한 우리나라는 전체 국토의 2/3 이상이 산악지형으로 형성되어 있어 주거 및 교통공간 등의 확보에 많은 어려움을 겪고 있다. 육상에서의 협소한 가용면적과 폭발적 인구밀집 현상은 새로운 실용적 공간 개발 및 창출이 요구되고 있다. 삼면이 바다로 둘러싸인 우리나라뿐만 아니라 세계 각국에서는 앞으로 전개될 21세기의 新공간으로 바다를 주목하고 있다. 해저터널은 환경친화적이고 태풍 등과 같은 악천후에도 안정적으로 도서지역 및 인접국가간 교통 및 물류수송체계 운용을 가능하게 하기때문에 현재 세계 주요 지역에서 격리된 두 지역을 잇는 글로벌 물류통로 건설계획이 널리 추진되고 있다. 국내에서 해저터널에 대한 본

격적인 연구는 2005년부터 국토해양부 첨단도시개발사업 중 “해저시설물차폐기술 연구개발”이라는 국가연구사업으로 비로소 시작되었다. 연구기간은 2005년 6월~2010년 6월까지의 총 5년으로 연구비 약 96억원이 투입되어 해저지반에 건설되는 ‘해저터널’과 ‘해저에너지저장시설’ 건설에 필요한 ‘차폐’기술 개발을 목표로 하고 있다. 본 연구과제수행을 위하여 해저시설물차폐기술개발 연구단(단장 신희순박사, 한국지질자원연구원)이 만들어 졌으며 4개 주관연구기관(한국지질자원연구원, 한국철도기술연구원, 한국건설기술연구원, SK건설), 4개 협동연구기관(건국대, 호서대, 한국지오택, 하경엔지니어링), 4개 위탁연구기관(서울대, 수원대, 한양대, 미국 PB사), 2개 참여기업(삼성건설, 태조엔지니어링) 등 14개 기관들이 참여하여 해저지반조사 및 계측기술개발분야, 해저시설물 수리역학적 설계기술개발분야, 해저터널 방배수 설계기술 및 신재료개발분야, 해저에너지차폐 및 시공시물레이션 기술개발 분야 등 차폐관련기술을 개발하고 있다.

2. 연구배경

우리나라는 동쪽으로는 경제대국 일본과 서쪽으로는 세계 거대 경제시장인 중국이 있는 지리적인 장점을 살려 이들 국가 및 주변 국가를 연결해 주는 허브 역할의 중요성을 인식하고 세계물류 및 경제의 중심이 되기 위해 도약해야 하는 시기에 와 있다. 최근들어 한·일 해저터널, 한·중 해저터널, 목포-제주 해저터널 등에 대하여 많은 관심이 집중되고 있음은 바람직한 현상이라고 할 수 있다. 앞으로 전개될 21세기의 국토 확장과 전 세계를 하나의 교통로로 연결하는 범국가적 프로젝트 실현에 대비하여 지상 교통로 건설은 확보하고 있으므로 해저터널건설을 위한 기반기술 개발 및 축적이 시급한 상황이다. '해저터널'을 이용하여 인근 도시지방과 육지를 연결하는 연육시스템은 해안지역의 사회간접시설 확충과 동시에 국토 확장의 효율성을 증대하고 주변 자연경관을 보호할 수 있는 환경친화적 기술로 분류된다. 또한 영국-프랑스 간 해저터널로 대표되는 국가 간 해저터널은 글로벌 경제시장 형성 및 하나된 지구촌을 구축하는데 일조하고 있다. 국내에서는 부산과 거제도를 연결하는 거가대교 칩매터널 공사가 2010년 12월에 완공 예정으로 있으며 해저지반에서의 굴착을 통한 국내 최초의 해저터널인 보령-태안 간

연결도로 공사가 2010년 착공하여 2016년 완공 될 계획이다. 최근 해외 건설시장에 있어서 해저터널 관련 프로젝트가 증가하고 있으며 특히, 우리나라 주변 일본, 중국 등에서도 해저터널건설수요가 점차 증가하고 있는 추세이다. 해저터널의 건설특성상 대규모 사업으로 발주되는 경우가 많으므로 잠재적인 시장규모는 매우 클 것으로 예측된다. 최근에 지중굴착식 해저터널의 건설기술이나 경험에 있는 나라는 노르웨이를 제외하면 거의 없으며 노르웨이도 최대 7.9km 길이의 해저터널 건설경험이 있을 뿐이다. 따라서 앞으로 초장대 해저터널에 대한 기술을 확보한다면 전세계 해저터널시장을 많이 선점할 수 있을 것이다. 현재 구상중인 대규모 해저터널계획으로는 대만 해협터널(125~170km), 베링해협터널(103km), 지브롤터터널(42.7km), 일본·러시아 해저터널(42km), 한·중 해저터널(198~374km), 한·일 해저터널(220km)등이 있다.

부존 자원 및 에너지가 부족한 우리나라는 에너지 자원의 자급이 곤란하므로 에너지 수급위기와 같은 충격을 최소화하기 위해서는 에너지저장시설의 확충이 필수적이다. 해저 지하암반에 건설되는 '해저에너지저장시설'은 지하암반이 가지는 제반 장점뿐만 아니라 높은 수압으로 인한 자연발생적 차폐효과 때문에 저장에너지의 누출손실을 최소화할 수 있는 장점이 있다. 국내에서는 1999년

표 1. 운영중인 국외의 주요 해저터널 사례

터널명	국가	터널길이(m)	완공년도	용도
Seikan	일본	53,850	1988	철도터널
Channel	영국-프랑스	50,450	1994	"
Shin Kanmon	일본	18,713	1975	"
Tokyo Aqua	일본	9,583	1997	도로터널
Xiang-an	중국	9,000	2010	"
Storebaelt	덴마크	8,024	1997	철도터널
Bømfjorden	노르웨이	7,931	2000	도로터널
Eiksund	노르웨이	7,797	2008	"
Oslofjord	노르웨이	7,390	2000	"
Nordkapp	노르웨이	6,875	1999	"

표 2. 계획중인 국내외의 주요 해저터널 사례

터널명	국가	터널길이(km)	최대수심(m)
한일해저터널	한국-일본	220	231
한중해저터널	한국-중국	198-374	76
중국·타이완터널	중국-타이완	125-170	70
지브롤타 해협터널	스페인-모로코	42.7	320
베링해협터널	러시아-미국	103	50
사할린·홋카이도터널	러시아-일본	42	40

에 평택 액화석유가스(LPG) 비축기지가 이러한 방식으로 건설된 바 있으며, 2009년에는 싱가포르에서 6억달러(한화 약 8000억원) 규모의 해저지하석유비축기지 사업이 발주되어 국내업체가 수주한 바 있다.

국내의 경우, 이러한 해저시설물 관련 설계 및 시공 경험이 부족하여 국제 경쟁력이 상대적으로 미흡하고 시공 요소 및 기술 분석 사례도 찾아보기 힘든 상황이다. 이에 본 연구의 성공적 수행을 통해 해저시설물 건설 관련 기술의 자립화 및 국외 시장 진출을 꾀할 수 있으며 새로운 국가 인프라 개발을 통한 침체된 국내 건설경기 부양도 가능할 것으로 기대된다. 한편, 이러한 해저시설물은 바다에 건설되기 때문에 외부에서의 접근이 곤란하여 주변 지반특성 파악에 많은 제약이 따르고, 막대한 양의 해수와 인접하고 있는 특수성으로 인하여 지반이 불량한 구간 통과 시 해수침투로 인한 작업장 붕괴 가능성이 높다.

이러한 안전사고의 발생, 건설 또는 운영의 중단은 막대한 경제적 손실을 가져올 뿐만 아니라 국민들로부터의 외면 및 국책사업에 대한 불신감을 증대시키는 등의 네거티브(negative) 시나리오로 전개될 가능성이 높은 특징이 있다. 따라서, 정확한 해저지반에 대한 지질학적/지반공학적 정보 확보, 해수침투에 대비한 지수 및 차수용 그라우팅, 방배수 개념 및 설계기준, 다양한 시공시뮬레이션을 통한 예측 가능한 문제점 파악 및 해결점 도출 등의 기술 개발 및 개념 정립 등이 필수적이라 할 수 있다.

3. 연구성과

연구단의 비전은 “안전하고 경제적이며 친환경적인 해저시설물 개발을 통하여 동북아교통, 물류 거점 확보 및 국가전략에 부응하는 에너지 비축환경 확보”이다. 기대성과 지표는 “해저시설물 수명 10% 향상, 해저시설물 시공 생산성 10% 향상, 에너지 비축능력 150일본 확보, 내수시장의 경제지표 10% 향상, 해저시설물 기술자립도 100% 달성”이다.

국내의 경우, 해저시설물 건설 경험이 절대적으로 부족하기 때문에 국내 여건에 부합하는 관련 기준, 시방 및 지침의 설정이 시급하다. 본 연구에서는 육상에서의 지하시설물 건설 노하우(know-how)를 바탕으로, 해저 환경하의 제반 기술적 문제를 검토하고 대응책을 발굴하여 안전하고 경제적이며 친환경적인 해저시설물 건설을 위한 조사/계측/설계/방배수 및 방재와 관련한 기술을 개발하고 있다.

3.1 해저지반 조사 및 계측 기술 개발(1세부과제)

한국지질자원연구원 박의섭 박사 연구진은 고효율 사전 지반조사 기술, 초기응력 측정기술 개선 및 정밀도 향상, 복합 탄성과 탐사기술, 지반조건별 계측관리 기준안 수립, 시공중 Risk 관리시스템을 개발하고 있다. 1세부과제에는 서울대학교 산학협력단 전석원교수팀이 참여하고

있다. 연구결과 중 저비저항의 해수의 영향을 극복한 해저 전기비저항 신속 지반조사 기술을 개발하여 현장적용하고 기술이전을 하였다. 또한, 해저터널 시공 및 운영 중의 계측 신기술 및 장비를 개발하고 계측체계 및 관리 기준을 제시하기 위한 연구가 진행 중이다.

개발된 해저지반 대전류 전기탐사 시스템을 소개하면 다음과 같다. 각종 산업 발전으로 연근해 지반조사 문제가 급증하고 있으나 적합한 기술이 없어 국내외 널리 쓰이는 육상 전기탐사기법을 해저지반조사에 특수 변형하여 적용하고 있는 실정이다. 외국에서는 대전류 전기탐사기술은 석유/가스 심해저 탐사에 탄성파탐사의 보완/확인용으로 최근에서야 비로소 사용되기 시작했다. 본 기술을 개발하기 위하여 그동안 지질자원연구원이 축적한 원천 기술을 바탕으로 확장한 설계로 하드웨어 계측시스템 구축하였다. 10 암페어 송신을 광양만지역 해상 빨지반을 대상으로 시도하여 적용성을 확인하였고 현재 성능을 대폭 향상중에 있다. 본 기술은 탄성과 굴절법탐사 결과가 미흡한 지역, 저비저항 해수 영향으로 통상의 전기탐사 장비적용 불가능지역에 적용이 가능하다. 본 해수 환경 전기탐사 기술은 전 세계적으로 필요성이 급증되고 있으며 북미, 유럽 일부국가에서 실용화초기단계이고, 일본에서는

연구단계에 있는 첨단기술이다. 광양만 지반조사 현장적용결과 자체 개발한 최대 5 암페어 송신전류에 의해 n=9 배열까지 깨끗한 쌍극자탐사 측정결과를 획득할 수 있었다. 지속적인 연구로 해저 전기비저항 신속 지반조사 기술 현장 실용화 및 관련 일선 산업체 보급하고자 하고 있다.

3.2 수리-역학적 설계 기술 개발(2세부과제)

한국철도기술연구원의 사공명 박사 연구진은 고수압 및 염해 등의 해저 환경을 고려한 터널 주변 손상영역 해석기법 개발, 고수압 조건에서의 해저지반 보강용 그라우팅 기술 개발, 해저터널 수리-역학적 안정성 해석기술 개발, 수직구 설계 및 내진해석 기술을 개발 하고있다. 2세 부과제에는 협동연구기관으로서 (주)한국지오택의 김진춘박사 연구팀, (주)하경엔지니어링의 신영완박사팀, 위탁연구기관으로 수원대학교의 유광호교수팀, 한양대학교 박두희교수팀이 참여하고 있다. 참여기업으로는 (주)삼성물산 건설부문, (주)태조엔지니어링이 있다.

대표적인 연구결과로는 해저지반 주입작업시 복상식 선단주입장치를 이용하여 주입압, 주입속도, 주입반경을 자동으로 제어할 수 있는 자동화 그라우팅 시스템(Automatic Grouting System, AGS)를 개발하여 실용화하였다. 본 기술을 개발한 계기는 해저지반의 터널, 각종 비축시설,

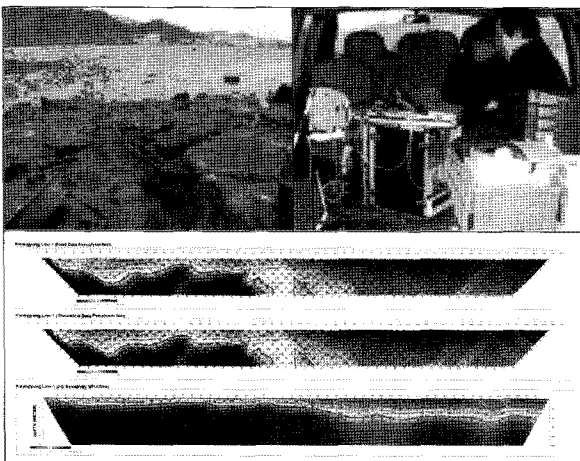


그림 1. 해저 전기비저항 탐사 현장적용 모습 및 결과 사례

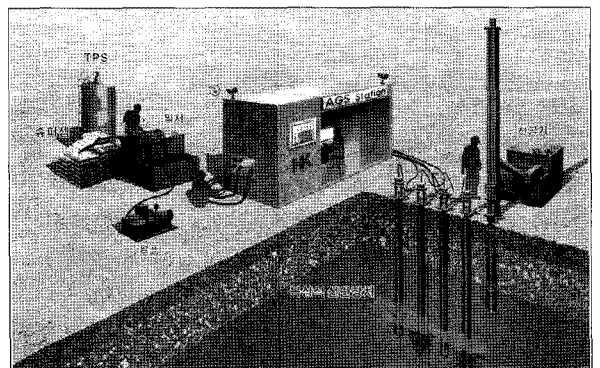


그림 2. 개발된 자동화 그라우팅 주입시스템 개요도

진출입시설 등에서 적용되는 해저지만 그라우팅은 해수 환경, 대심도 과지압 환경에서 시행되므로 내해수성 주입재, 주입효율을 증진시킬 수 있는 복합주입선단장치, 지반유형에 대응이 가능한 주입압-주입속도 관리시스템 등이 필수적으로 요구되었다. 또한 해저시설물 공사 중 차수지수를 위한 주입재료 및 주입공법의 선택기준 정립 등 해저시설물 그라우팅 설계 기술 정립이 필요하였었다.

개발된 자동화 그라우팅 공법(특허 제 10-0625333호)의 특징은 다음과 같다.

자동화그라우팅 시스템을 적용한 Smart Grouting으로 주입중단 자동관리를 통해 정량-정압관리가 가능하며 한계주입압을 관리하여 수압파쇄, 열림주입 및 일탈주입을 방지할 수 있고, 재료유실 방지 및 주입량 정산 근거를 자동으로 확보할 수 있는 통합 관리형 그라우팅공법으로 편의성, 품질 및 경제성을 향상시켰다. 그동안 개발된 기술의 적용한 공사로는 고속국도 제 10호선(목포~광양 11공구) 건설공사, 서울지하철 915공구 건설공사, 인천지하철 201공구 외 4개 공구, 용평사당댐 신축공사 중 지반보강, 4대강 정비사업 현장 시험시공 외 다수가 있다.

또한 강관보강 자동화 다단주입 RAM공법(Reinforced-rod Auto-grouting Method)을 개발하였다. 본 공법(특허 제 10-0118396호)은 강관다단 그라우팅을 적용하는 현장에 AGS를 적용하여 주입압과 주입속도를 자동 제어함으로써 수압파쇄 및 일탈주입을 관리할 수 있는 강관보

강 자동화 다단 그라우팅 공법이다. 공법의 특징은 AGS를 적용한 Smart grouting이며 정밀한 주입관리로 강관과 지반의 일체성 향상시켰고 시공의 편의성, 품질 및 경제성 향상시켰다. 본 공법은 동홍천~양양 14공구 건설공사, 서울지하철 703공구 건설공사, 오리-수원 1, 2, 6공구 노반시설공사 등에 적용되었다.

3.3 해저터널 방배수 설계 기술 및 신재료 개발 (3세부과제)

한국건설기술연구원의 이성원 박사 연구진은 해저터널 방배수 시스템 구축을 위한 신개념 및 설계 기준을 정립하였다. 내압성 및 내구성이 우수한 부직포와 차수능력이 탁월한 벤토나이트를 결합하여 고수압에 적용 가능한 Active 라이닝 수밀장치 및 시공법을 개발하였으며 국내 기준을 마련 중이다. 대용량 유입용수의 유도배수를 위한 최적형태의 바닥배수판을 국산화하였으며 시제품을 제작하여 현장적용시험중에 있는데, 앞으로 산업체에 기술이전을 할 예정이다. 시험결과 본 제품의 통수량은 기존 외국 제품보다 최대 25% 우수한 것으로 확인되었다. 3세부과제에는 협동연구기관으로 호서대학교의 김상환교수팀, 건국대학교의 신중호교수팀, 위탁연구기관으로 한양대학교의 윤성범교수님, 미국 PB사(Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas, Inc)의 최성훈박사팀이 참여하고 있다.

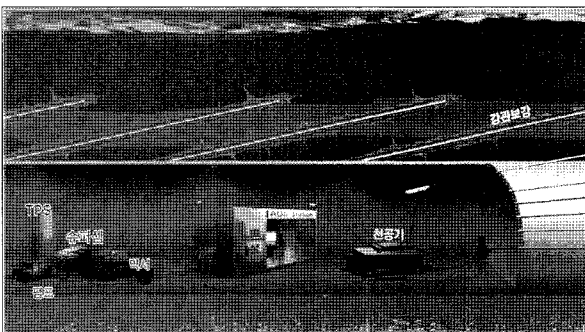


그림 3. 개발된 강관보강 자동화 다단 그라우팅공법 개요도

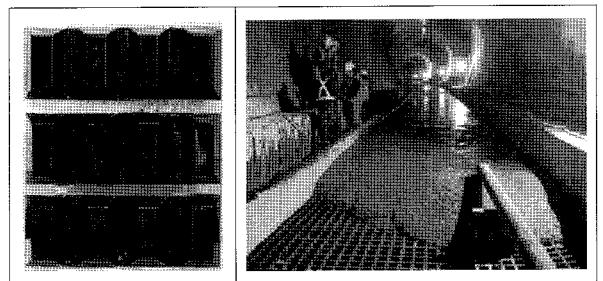


그림 4. 개발된 대용량 바닥배수판 현장적용 모습

3.4 해저에너지저장시설 차폐 및 시공시뮬레이션 기술 개발(4세부과제)

SK건설(주)의 이진무 부장 연구진은 그동안 외국기술에 의존하여 왔던 해저 대단면 에너지 저장시설을 위한 수벽시스템(water-curtain) 차폐구조 설계 기술을 자립화 하였다. 또한 저장 LNG가스의 극저온(-162도) 특성을 활용하여 공동주변 지하수를 동결시켜 저장시설을 차폐하는 ice-ring 차폐기술을 세계 최초 개발하고 상용화를 위한 노력중이다. 시공전 위험도 예측 및 평가가 가능한 4D공정계산 및 시공시뮬레이션 기술(공정별 3D CAD/크

리깅 모형분석, 분석공정의 암반별 등급계산, 분석결과에 따른 공정별 일정 및 비용산출, 지질시뮬레이션, 계측관리 모듈이 연계된 통합패키지)을 개발하였다. 개발된 시공시뮬레이션 통합 패키지는 해외 해저터널 및 지하유류비

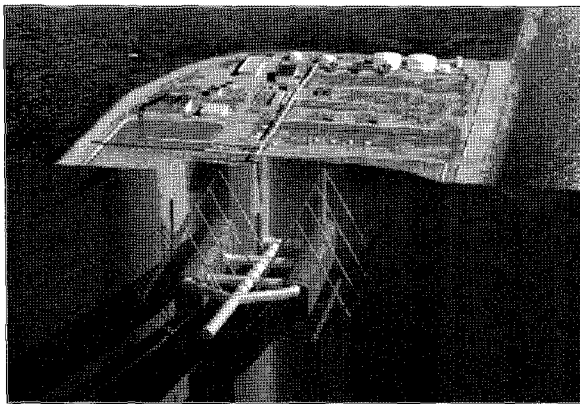


그림 5. 수벽시스템(water-curtain) 차폐구조

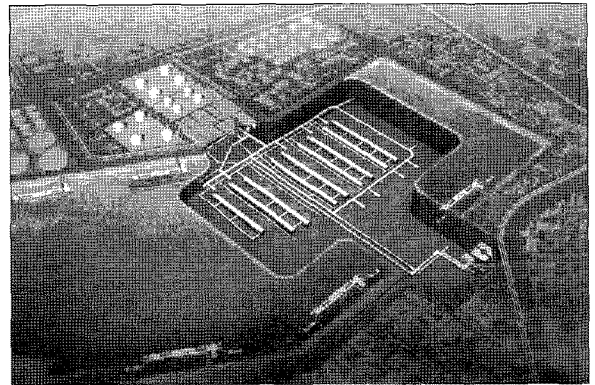


그림 7. 해저 에너지저장시설 개념도

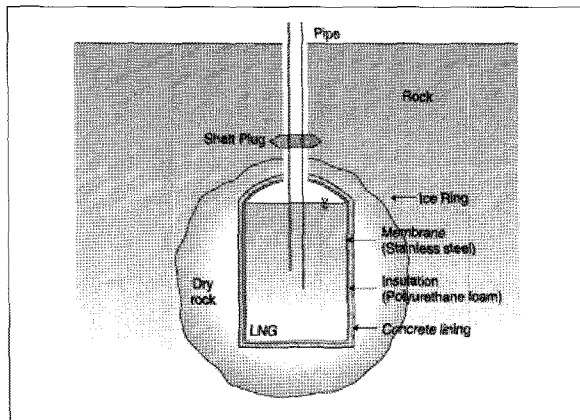


그림 6. 해저 LNG 저장시설주변 ice-ring 차폐설계 개념도

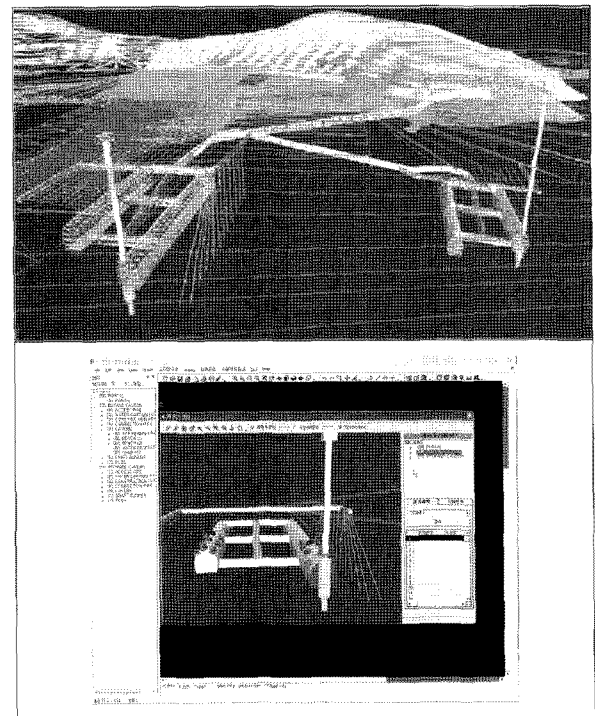


그림 8. 개발된 시공시뮬레이션 통합패키지

축기지 건설사업 수주(터키 보스포러스해협 해저터널, 인도 지하원유비축기지)시 활용되었다.

4. 기대효과 및 개발기술의 활용

해저시설물 건설에 필수적인 차폐핵심기술을 개발하는 본 연구의 성공적 수행은 국내여건에 적합한 ‘해저터널’ 및 ‘해저에너지저장시설’ 건설과 관련한 조사/설계/시공 단계에서의 귀중한 가이드라인 제시뿐만 아니라 관련 기술의 자립화 및 국산화를 이루어낼 수 있을 것으로 기대된다. 해저터널 시공 경험이 전무하던 국내에서도 보령(대전항)-태안(원산도)간 해저터널 공사(길이 6.9km, 세계 9번째 장대해저터널)가 계획되어 2010년 현재 상세설계가 진행 중에 있다. 본 연구개발의 결과로 얻어진 차폐핵심기술은 국내 유일의 해저터널 건설 현장인 보령-태안 연결도로 공사를 통해 기술 실증뿐만 아니라 관련 공사의 설계, 시공 및 운영단계에서의 지속적인 기술 지원 형태로 활용될 계획이다.

이러한 국내 연구 개발 및 관련 기술의 자립화는 국외 해저시설물 건설시장에의 적극적 진출, 국내 관련 산업의 육성 도모 및 국외 건설공사 수주를 통한 국익 신장에도 기

여할 수 있을 것으로 기대된다. 실제로 본 연구 협동연구 기관 중 하나인 SK건설(주)은 지난 2009년 유럽과 아시아 대륙을 연결하는 터키의 보스포러스해협 해저터널 공사(공사액: 10억달러, 공사기간: 55개월, 터널길이: 3.34km)를 수주한 바 있으며, 같은 해 인도에서는 지하원유비축기지 공사(공사액: 1,200억원, 공사규모: 원유 150만톤)를 수주하는 실적을 올렸다.

우리나라의 경우, 경제대국 일본과 신흥 경제세력인 중국의 사이에 놓여 있는 지리적 이점에 따라 ‘해저터널’을 이용하여 새로운 동북아 교통네트워크를 구축함으로써 물류 수송의 중심국가로의 부상이 가능할 것으로 기대된다. 최근의 한중 및 한일 해저터널에 대한 높은 국민적 관심으로 비추어 볼 때 우리나라가 동북아 교통/물류 거점을 확보하고, 해저터널을 통해 아시아-시베리아-유럽을 연결하여 하나된 지구촌을 형성하는 초대형 프로젝트도 더 이상 꿈이 아닌 실현 가능한 사업으로서의 가능성이 매우 높아졌다고 할 수 있다.

본 연구개발을 통해 국산화된 해저시설물 차폐핵심기술들은 이들 세계 각국의 초대형 프로젝트 건설현장을 누비며 대한민국의 첨단 건설기술 위상을 한껏 드높일 수 있을 것으로 기대한다.