

Tunnelling Technology

해저터널 기술 현황 - 국내외 현황 및 특성



박의섭
한국지질자원연구원
지반안전연구부 선임연구원



신희순
한국지질자원연구원
지반안전연구부 책임연구원

1. 서 언

해저터널은 교량, 선박 등과는 달리 태풍, 폭우 등과 같은 악천후에도 안정적으로 국내 도서지역 및 인접국가간 교통 및 물류수송체계 운용을 가능하게 하는 주요 사회기반시설로서 활용되어 왔다. 또한 현재 세계 주요 지역에서 철도와 운하, 해저 터널 등 격리되어 있는 두 지역을 잇는 글로벌 물류통로 건설계획이 속속 추진되고 있다. 이 같은 사업이 본격적으로 추진될 경우 국가간의 지리적인 장벽이 허물어지고, 세계 물류환경뿐만 아니라 향후 정치, 외교적인 역학관계에도 크게 영향을 미칠 것으로 전문가들은 분석하고 있다. 이러한 글로벌 물류통로 건설은 아시아는 물론 중남미와 중앙아시아, 그리고 유럽과 아프리카 등 세계 곳곳에서 동시 다발적으로 일어나고 있는 것이 특징인데, 특히 동북아를 포함

한 유라이사 대륙에 집중되고 있다. 동북아 지역의 경우 중국과 타이완의 해저터널 건설, TSR과 TKR 연결, 그리고 베링해를 가로지르는 러시아-알래스카 해저터널 공사도 추진되고 있다.

해저터널 프로젝트의 성사여부는 건설비용과 향후 수익성을 어떻게 확보할 것인가가 사업 추진에 최대 관건이 될 것으로 여겨진다. 예를 들어 지브롤터 해저터널과 베링해 해저터널의 경우 각각 150억 달러와 120억 달러에 달하는 천문학적인 공사비가 들어갈 것으로 예상되고 있는데, 이 비용의 확보가 주요 관심사이다. 하지만 건설비용이 걸림돌로 작용하고 있음에도 불구하고 각 지역에서 이 같은 사업을 추진하고 있는 것은 경제적인 시너지 효과가 워낙 크고, 경제 외적인 부수적인 효과도 수반되기 때문이다. 즉, 떨어져 있는 두 대륙이 해저터널 등으로 이어지게 되면 정치, 외교 등 여러 가지 측면

해저터널 기술 현황 - 국내외 현황 및 특성

에서 상징성이 크고, 경제에 미치는 직간접적인 파급효과 또한 상당한 것이 사실이다. 특히 연결되는 두 지역의 통합과 인적, 물적 교류 촉진이 가장 큰 이점이라는 견해가 있다.

이와 같이 최근 들어 세계화, 정보화의 흐름 속에 동북아 역내 교역량, 자본 이동, 인적 교류의 증대가 가속화됨에 따라 역내 국가 간의(중국, 일본 등) 경제교류 확대에 대비한 사회문화적·물리적·제도적 교류기반의

구축이 중요해지고 있다. 이러한 시점에서 동북아의 통합 교통·물류체계 구축을 위한 해저터널 건설이 실현될 경우 우리나라는 동북아의 중심거점으로 성장할 수 있을 것이다.

이에 본 연구에서는 해저터널의 세계적인 건설동향에 발맞추어 해저터널의 조사 및 설계기술의 현황을 살펴보고자 한다.

2. 해저터널의 국내외 동향

2.1 국내 동향

1932년 동양최초로 만들어진 경남 통영시의 해저터널은 길이 461m, 너비 5m, 높이 3.5m로 양쪽 바다를 막고 바다 밑을 파서 운하 폭을 넓힌 후 콘크리트 터널을 5년 6개월간 건설 완공한 바 있다.

또한, 마산만 가스배관용 해저 횡단터널(연장 1.35km)이 2000년에 완공되었으며, 2003년에는 거제-부산간을 연결하는 거가대교 8.2km 구간 중 3.7km는 침매터널로 시공하는 사업이 발주되어 현재 시공 중에 있다.

이와 같이 국내 해저터널 건설은 통영시 해저터널 건설 사례 이외에는 전무한 상황이나, 해저터널과 설계 및 시공 조건이 유사한 한강, 안양천 및 부산 수영강 하부를 횡단

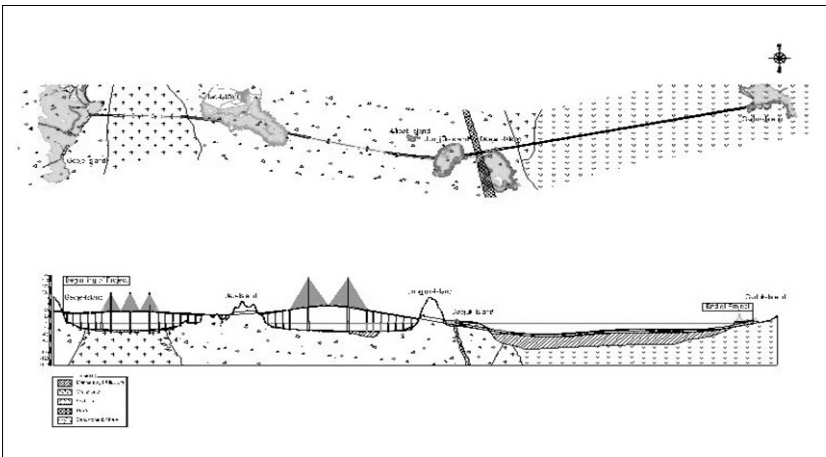


그림 1. 부산-거제간 침매터널 노선



그림 2. 안면연륙교 개발 노선(안)

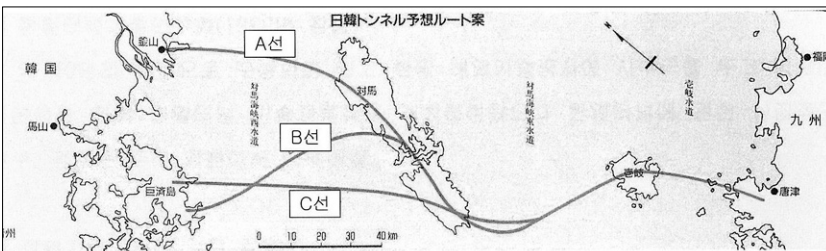


그림 3. 한-일 해저터널 예상 노선(안)

해저터널 기술 현황 - 국내외 현황 및 특성

하는 해저터널의 설계 및 시공을 통하여 기술력을 축적하여 온 상황이다.

해저터널의 국내 연구로는 2005년 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업 중 “해저시설물 차폐기술개발”이란 연구사업을 추진함으로써 해저터널 건설의 핵심기술 중의 하나를 개발하고 있다. 이 연구과제는 한국지질자원연, 한국철도기술연, 한국건설기술연 등이 연구기관으로 참여하여 해저지반 조사 및 계측분야, 해저시설물 수리-역학적 설계분야, 해저터널 방배수 분야에서 차폐기술 개발과 관련하여 연구를 수행하고 있다. 한편 2003년 9월에 발표한 건교부의 건설기술혁신사업 R&D 프로그램 중 국토의 효율적 활용분야의 해양공간개발 활용기술(해저터널)에 대한 중요도와 시급성을 분석한 결과, 총 29개중에서 우선순위 9위로 평가된 적이 있다.

또한 2006년에 발표한 정부의 “제4차 국토종합계획 수정계획(2006~2020)”의 경쟁력있는 개방국토라는 기본 목표를 근거로 동북아의 물류·금융·교류중심지로 도약하기 위해 국토의 개방 거점을 확충하고 상생적 국제협력력을 선도하는 기반을 조성하고자 하는 적극적인 정책 지원이 있을 것이다. 이를 위해 정부 주도하에 관련 업체를 중심으로 육상 터널 건설경험을 기반으로 해저터널의 안전성 및 경제성에 초점을 둔 기술개발에 집중할 것으로 전망된다.

해저터널과 관련하여 여러 지자체 또는 국가가 현재 추진 중인 사업이 여러 개가 있다. 충남도는 보령시 신흥동 대천항에서 태안군 고남면 영목항까지 14km(교량 7.3km, 접속도로 6.7km)에 이르는 태안군 연륙교 사업 구간 가운데 2.4km는 국내 최초로 해저터널을 건설하여 배의 자유로운 통행을 보장할 예정이다. 이는 3.3km에 이르는 교량구간에서 해저터널로 연결되는 터널 진입부에 7만5000㎡ 규모의 인공섬이 건설되고, 교량에서 해저터널을 거쳐 바로 원산도까지 연결되는 것으로 약 4890억원이 투입될 전망이다.

제주도는 오는 2040년을 목표로 목포-제주나 원도-제주간 해저터널 개설사업을 적극 검토하기로 하고, 이 사업이 성사하기 위해 우선 타당성 등의 용역비 확보만이라도 꺾할 수 있도록 행정력을 모으기로 하였다(한라일보, 2007년 4월 17일자).

부산시는 한·일 해저터널 건설의 타당성 여부를 파악하고자 부산발전연구원을 중심으로 일본의 한·일해저터널연구회와 국내 찬반측 전문가들을 초청하여 한·일 해저터널이 미치는 영향을 일본측, 한국측, 부산측의 관점에서 조명하고 미래를 준비하고자 하는 목적으로 「한일해저터널과 부산의 선택」이라는 주제로 한일 국제심포지엄을 개최하였다(2007년 5월 14일).

2.2 국외 동향

19세기와 20세기에는 수에즈 운하와 파나마 운하가 건설되어 태평양과 대서양을 연결하였으나, 21세기에는 러시아와 알래스카를 잇는 베링해협 해저터널, 유럽과 아프리카를 잇는 지브롤터해협 해저터널, 캄차카반도와 북해도를 잇는 쿠릴해구 해저터널 등을 건설하는 대규모 토목공사들이 예상되고 있다. 이와 같이 전 세계적으로 해저터널 관련 프로젝트가 증가함에 따라 해저터널 관련기술 선진국에서는 본격적인 시장개척을 위하여 발 빠르게 움직이고 있는 추세이다. 해저터널 관련선진국의 동향을 살펴보면 다음과 같다.

(1) 일본

1930년대에 세계 최초로 간몬 해저터널을 완성한 이후, 세이칸 해저터널(연장 23.3km), 동경만 해저터널 등의 건설을 통하여 해저지반 조사, 설계, 시공 및 유지관리 등에 관한 핵심기술을 오래전부터 축적해왔다. 프랑스 측에서 사용한 대부분의 쉴드 TBM장비를 제작/시공하면서 많은 노하우를 축적할 수 있었으며, 영-불 해저터널보다 앞서 1946년 지질조사착수 이래 40여년 만

해저터널 기술 현황 - 국내의 현황 및 특성

에 Tsugaru 해협선을 개통한 세이칸 터널의 건설을 통해 해저터널 건설기술에 있어서는 선두자리를 차지하고 있다. 또한, 동경만 해저터널을 건설 시에는 쉴드 TBM 두 대를 해저밑 지중에서 접합하는 새로운 기술을 시도하여 성공적으로 시공한 노하우를 축적하고 있다.

최근 이러한 기술개발에 힘입어 유럽과 아시아대륙을 연결하는 보스포러스 해저터널의 공사(총 20~25억달러)를 수주하여 시공 중이고, 러시아와 알래스카를 잇는 베링해협 해저터널 프로젝트에도 공사비의 일부를 투자할 계획이 있음을 발표하였다.

(2) 미국

미국은 1920년대부터 홀랜드 해저터널, 링컨 해저터널 등의 건설을 통하여 해저터널시공에 따른 터널 내부 압력차를 극복하는 굴착법 및 터널내 화재에 대한 엄격한 안전 규칙을 규정하는 다양한 노하우를 축적해 왔다. 뉴욕은 '수상의 도시'라고 불리우며, 60여 개의 교량과 해저 터널로 연결되어 있음. 현재도 뉴저지와 뉴욕을 연결하는 72억 달러 규모의 Trans-Hudson Passenger Rail Tunnel 프로젝트를 진행 중이며, 선박운행의 필요성 교량 대신 3.4km의 하저 터널이 검토되고 있다.

최근 미국과 러시아는 시베리아의 석유와 천연가스를 파이프라인으로 공급하는 프로젝트의 일환으로 러시아와 알래스카를 연결하는 약 102km의 베링해협 해저터널 프로젝트(러시아 동부 메가프로젝트, 약 650억달러) 계획이 논의되고 있어, 프로젝트가 가시화될 시에는 미정부뿐만 아니라 관련 업체에서도 적극적으로 참여할 것으로 예상된다. 베링해협 해저터널 구상은 1905년 제정 러시아 마지막 황제인 니콜라스 2세에 의해 처음 구상되었으나 1차 세계대전에 의해 중단된 적이 있다.

미국의 해저터널 관련업체는 자국내 해저터널 시공경험을 바탕으로 해외시장에도 적극적으로 진출하여 시공 분야보다는 프로젝트 관리 분야에서 활발한 활동 중에 있다.

(3) 영국과 프랑스

영국과 프랑스를 연결하는 Channel 해저터널은 해저 부분이 약 38km로써 2개의 철도터널과 1개의 서비스 터널로 구성되며, 서비스터널의 시공을 통하여 양편 터널과의 균형문제 및 지질상태 등을 사전에 파악하여 예상문제에 용이하게 대처하였다. 이 채널터널 건설을 구현하는 데에 약 200여 년간 구상과 연구의 시기가 소요되었고, 영불해협 바다 밑의 지반조사는 100년이 넘도록 수행되었으며 지난 3년간 100개 이상의 시추공에 의한 지반조사를 통해 최적의 영불해협터널 노선선정을 할 수 있었다. 영국과 프랑스에서 모두 각각 6개의 쉴드 TBM을 사용하여 굴착시공을 하여 최첨단의 기계화 시공법에 의해 유로터널을 건설하였으며, 약 7년간의 공사 기간 중에 다양한 쉴드 TBM을 설계, 제작 및 시공하면서 기계화 시공법에 대한 수많은 요소기술들이 개발되고 적용되었다.

(4) 노르웨이

국제적으로 터널건설기술의 선진국이라고 할 수 있는 노르웨이는 1981년 Vardø에 최초의 해저터널이 건설된 이래로 지난 20여년간 약 30여개 해저터널을 건설하였으며, 이는 전 세계 해저터널의 절반 이상을 차지하고 있다. 현재도 총 합계 연장이 약 100km에 달하는 도로해·하저 터널을 시공 중이거나 계획 중에 있으며, 노르웨이 교통부에서는 1998년 해수면 아래 25m 깊이, 1400m 연장의 "부유식 해저 터널"에 대한 건설계획을 제안하고 이의 가능성을 검토한 바도 있다.

운용중인 해저터널은 34개소 130km이며, 해저도로 터널은 23개소 95km에 달한다. 해저터널 중 가장 깊은 터널은 해저 287m인 Eiksund 터널이며, 가장 긴 해저 터널은 Bømlafjord 터널로써 총연장이 7,931m이며 해저 263m에 위치하고 있다. 현재 연장이 24,200m인 Rogfast 터널과 13,500m인 Ryfast 터널 프로젝트도 진행 중이다.

표 1. 구상중인 세계의 해저터널 프로젝트

Country	Tunnel	Length
China	Mainland - Taiwan	125 km
Estonia - Finland	Tallin - Helsinki	54~80 km
Finland - Sweden	Umeå - Vaasa	25~48 km
Ireland - Wales	Dublin - Holyhead, Irish Sea	95 km
Japan - Korea	Tsushima-kaikyo (Strait) and Korean Strait	55+65 km
Russia - Ukraine	Kerch Strait (Krasnodar - Krym)	45km
Marokko - Spain	Gibraltar	38.7 km
Russia - USA	Bering Strait	74.4 km

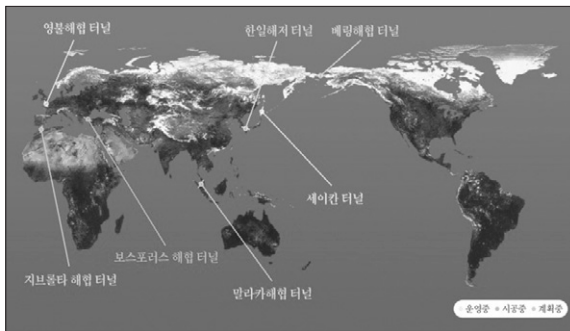


그림 4. 대표적인 세계의 해저터널 프로젝트

노르웨이는 해저터널 공사시 매우 불량한 암질구간에 서 붕괴사례를 몇 차례 경험하였지만 상부지반의 대규모 붕괴 전에 굴착을 중단하고 지반을 보강하여 안정화시켰다. 이를 통하여 해저터널의 최소 암반두께에 대한 경험적인 기준을 제시하고 있다. Norwegian Public Roads Administration(Statens Vegvesen, 1992)에 의해 해저터널의 설계 지침이 다음과 같이 만들어졌다. 정밀 지반조사를 하기 전에는 최소 암반두께를 50m로 기초한 설계를 하여야 하며 상세한 조사가 이루어져 양호한 조건이 문서화되면 최소 암반두께를 40m이하로도 인정될 수 있다. 이와 같이 노르웨이의 경우엔 수많은 해저터널의 건설 및 운영경험을 통하여 해저지반 조사, 암질불량구간 대처방안, 막장 붕괴시 조치 등의 시공중 안전과 대형 재해방지를 위한 여러 가지 기술지침들이 개발 적용되어왔다.

(5) 중국

최근 국제 경제시장에서 주목을 받고 있는 중국이 자체적으로 설계한 최초 해저터널은 Xiamen East 해저 도로터널로서 2005년 5월 건설이 시작되어 2010년에 완공될 예정이다. 이 터널은 아모이섬 서쪽의 산악로와 접하며 동쪽 5개 선착장에서부터 내륙의 상안구까지 연결되고 또한 상안터널과 접해있다. 터널의 길이는 9km로 이 가운데 바다를 건너는 주요 터널의 길이는 5.95km이다. 총 건설비용은 약 32.5억 위안(미화 391.5백만달러)으로 예상된다. 이외에 1998년 11월 중국 푸젠성 샤먼에서 미국, 프랑스, 일본, 싱가포르의 터널 전문가 70여명이 모여 대만과 중국을 연결하는 대만해협 해저터널 건설방안을 논의하였다. 검토노선은 북선과 남선2개안으로 북선은 푸젠성 푸칭 핑탄 대만 신주에 이르는 길이 130km의 터널이고 남선은 샤먼 진먼 핑후 대만 자이를 연결하는 길이 210km의 터널이다. 북선을 채택할 경우 건설비용은 1조 4400억위안이고, 건설기간은 16년으로 각각 추산된다.

2.3 해저터널의 시장전망

세계의 해저터널 시장규모를 살펴보면, 발주 물량은 많지 않으나 해저터널의 건설특성상 대규모 사업으로 발주될 경우가 많으므로 잠재적인 시장 규모는 매우 클

해저터널 기술 현황 - 국내외 현황 및 특성

것으로 예측된다. 예를 들면, 향후 발주 예상되는 사업은 대만해협 해저터널(대만-중국, 연장 130~210km, 1조 4400억위안 규모), 지브롤터 해저터널(스페인 카날레스-모로코 시레스, 27.7km), 베링해협 해저터널(러시아대륙 동단-북미대륙 알래스카, 85km, 200조원 규모) 등이 있다.

유럽 대륙과 아프리카 대륙을 잇는 지브롤터 해저터널의 건설을 위하여 1980년 10월 스페인과 모로코간에 협정이 체결된 바 있다. 1989년 타당성 조사를 위한 추가협정이 있었고, 1990~1996년 4차례 국제회의를 개최, 타당성 및 개발방향을 논의하였다. 1990년 예비타당성 조사가 완료되었고 1996년 1단계 조사가 완료되어 기본 노선대안이 결정되었으며, 1997년부터 2단계 타당성 조사중에 있다. 최대수심은 320m, 해저면에서 100m 하부로 터널이 위치한다. 터널의 길이는 스페인 카날레스~모로코~시레스간 42.7km(해저터널구간 27.7km)으로 셔틀열차로 승객과 화물, 차량을 수송하며, 최고 속도는 120km/h이다. 공사는 2단계로 시행되며 1단계는 2045년까지 수요를 처리할 1개의 터널을 건설, 연간 경차량 158만대와 중차량 46만대, 1,600만명의 여객을 수송할 예정이다.

러시아 극동 사할린 섬과 본토인 하바로프스크주를 철도가 깔린 해저터널(7km)로 연결하고, 다시 사할린과 일본 홋카이도를 잇는 해저터널(42km)을 건설하는 방안도 검토되고 있다. 한편 러시아대륙 동단과 북미대륙 알래스카 사이의 베링 해협 85km를 해저터널로 잇

는 계획이 있는데, 이는 200조원이 투입되는 초대형 사업이며, 최근 기초 설계를 위해 자료조사를 한 것으로 알려졌다. 이러한 해저터널 프로젝트를 살펴보면 표 1과 같다.

3. 해저터널의 특징

해저터널은 일반적인 육상터널과 달리 해수면 하부 지반에 위치하므로 기획, 조사, 설계 및 시공방법에 있어서 많은 차이점을 갖고 있다. 또한 해저터널은 지상터널과는 비교할 수 없는 초장대 터널이기 때문에 예상치 못한 지층의 변화 또는 고수압에 의한 돌발적인 사태 발생에 대비한 고도의 시공 및 유지관리 기술이 요구되며, 지역적으로 크고 작은 단층대가 발달되어 있어 지상터널건설과는 다른 새로운 개념의 굴착 및 위험 대처기술이 필수적이다.

일반적으로 해저터널은 다음과 같은 특성을 가지고 있다.

- 1) 사업지역의 대부분이 바닷물로 덮혀 있어 외부로의 접근이 매우 제한적이라 해저지반의 특성을 파악하기가 매우 어려워 지질학적 불확실성과 위험에 더 큰 영향을 받는다. 따라서 해저지반의 지질학적 불확실성 및 위험요인을 최대한 배제할 수 있는 특수한 조사기술들이 적용되어야 하며, 조사결과의 해석에서도 불확실성을 최대한 줄일 수 있는 기법들이 사용되어야 한다.
- 2) 해저터널이 통과하는 해협의 위치는 종종 기반암 내에 대규모 단층이나 연약대를 포함하고 있어, 어려운 시공조건을 야기한다. 이러한 구간에서의 해수유입은 터널 자립시간을 극적으로 감소시키며 심한 경우 막장 붕괴를 유발하기도 한다.
- 3) 해저터널의 양쪽 출입구로부터 경사져 진입해야 하므로, 지반상태의 파악이 매우 중요하다. 한편

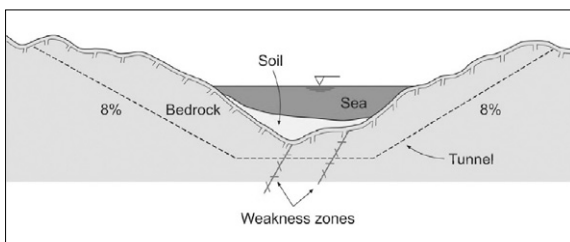


그림 5. 해저터널에 관련된 일반적인 지형 특성

해저터널 기술 현황 - 국내의 현황 및 특성

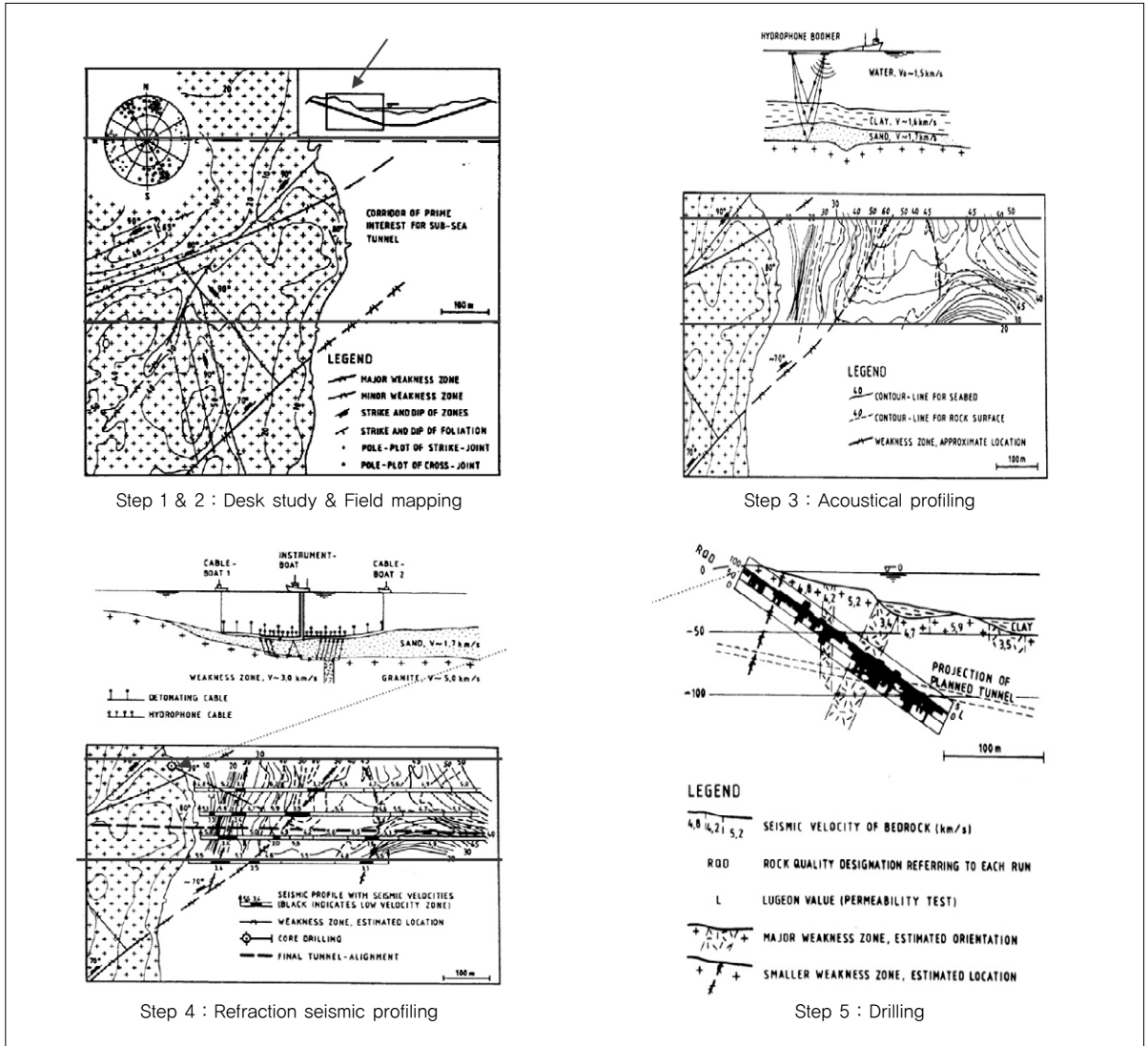


그림 6. 해저터널의 일반적인 조사 단계(Step 1~5)

터널 시공 중에 모든 장비 진출입 및 환기, 배수 등이 이 출입구를 통하여 행해지는 불리한 시공환경을 가지고 있다.

- 4) 터널 상부에 해수가 위치하고 있어 잠재적인 해수 유입은 무한정이고, 모든 유입수는 펌프를 이용하여 터널 외부로 배출되어야 한다.

- 5) 유입된 해수는 염분을 함유하고 있어 터널 시공장비 및 암반 보강재료에 상당한 문제를 유발하므로 시공 및 운영중에 심각한 영향을 준다.

해저터널의 조사는 일반적으로 다음 5단계로 수행되며, 노르웨이의 경우 조사비용은 굴착비용의 5~10%를

해저터널 기술 현황 - 국내의 현황 및 특성

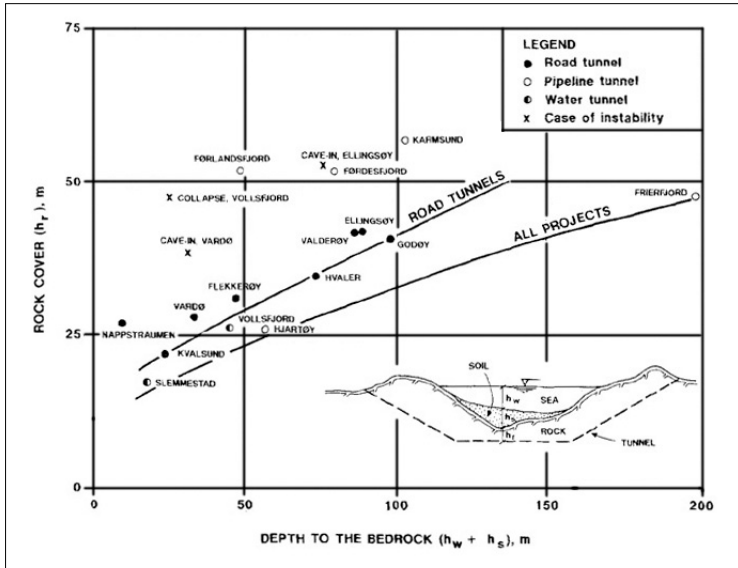


그림 7. 노르웨이 해저터널의 최소 암반두께 산정법(after B. Nilsen, 1994)

차지하는 것으로 알려져 있다(그림 6).

- 1) 기존 문헌 조사를 통한 기초정보의 검토
- 2) 대상 부지의 해안가를 중심으로 한 지질도 작성
- 3) 해상 음향탐사(Acoustical Profiling)에 의한 해저 지형의 파악
- 4) 해상 굴절법 탐사기법에 의한 해저지반의 특성과악
- 5) 주요 지점에 관한 직접적인 시추조사

이와 같이 수행된 지질조사는 다음 사항들에 중요한 기반자료를 제공한다: 터널 노선 및 단면 결정, 굴착/보강/차수/배수방법의 설계, 비용 및 공사기간의 예측, 주변 환경에 미치는 영향 평가 등.

일반적으로 시공 전에 수행된 지질조사를 통하여 해저터널의 계획 및 시공에 중요한 기반자료를 제공할 수 있으나, 광범위한 조사를 수행한 경우에도 예측치 못한 지질조건을 간혹 경험할 수 있다. 이는 시공 전뿐만 아니라 시공 중에도 터널 전방에 대한 지질조사를 지속적으로 수행하여야 하는 필요성을 알려준다.

그림 7은 해저터널의 계획시 최소 암반두께를 어떻게 결정하는가에 관한 노르웨이의 산정기법을 보여주고 있다.

상부 암반두께가 증가하면 이에 따라 터널의 연장이 필요이상으로 길어져 추가적인 건설비용이 소요되며 터널 운영시에도 유지관리비와 교통비용이 증가한다. 반면 지나치게 작은 상부 암반두께는 시공 중 굴착작업의 불안정성, 과도한 해수 유입 등의 문제를 유발시켜 과도한 그라우팅 및 막대한 배수비용을 요구한다. 가장 우려되는 사태는 연약대 구간의 통과시 터널이 붕괴되어 급격한 다량의 해수유입으로 터널 전체가 침수되는 것이다.

상황에 따라서 침수된 터널이 복구될 수 있으나 상당한 공사지연과 막대한 추가비용이 소요되어 해저터널 사업의 경제성이 쉽게 손상될 수 있다. 일본 Seikan 터널의 경우 최대 수심은 140m, 최대 토피고는 100m로 약 2.4MPa의 정수압이 예상되어, 그라우팅을 통하여 주변 암반의 투수계수를 조절하고 터널내 유입량을 최소화함으로써 라이닝에 가해지는 압력을 줄인 사례가 있다.

따라서 최적 암반두께의 산정은 터널 연장과 경제성에 막대한 영향을 미치므로 초기 계획단계에서 이루어져야 한다. 노르웨이의 시공사례에 의하면 해저 도로터널(단면적 50m², 경사 8%)의 경우 최소 암반두께를 1m 줄이게 되면 약 NOK 1 million(USD 150,000)의 공사비 감소를 가져온다고 한다.

노르웨이의 경우, 수많은 해저터널의 시공경험을 통하여 Norwegian Public Roads Administration (Statens Vegvesen, 1992)에 의해 지침이 만들어졌다. 이에 의하면 건설공사시 잠재적 불안정에 대비한 최소 암반두께를 요구하고 있다. 정밀 지반조사를 수행하기

해저터널 기술 현황 - 국내외 현황 및 특성

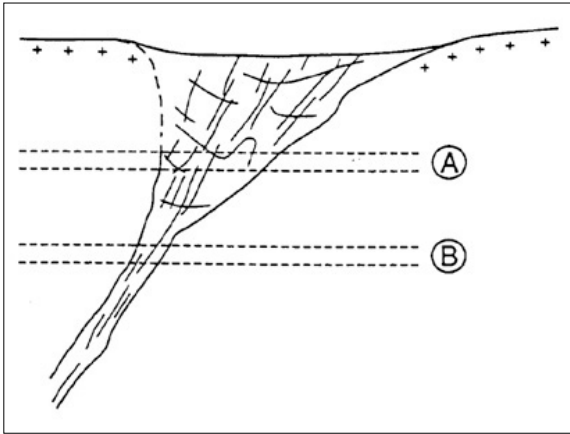


그림 8. 연약대 존재에 따른 터널 심도 결정: 천심도 터널(A 노선)은 더 깊은 터널(B 노선)보다 더 넓은 연약대를 통과한다. (Nilsen et al, 1997)

전에는 최소 암반두께를 50m로 설정하여 설계를 하여야 하며, 상세한 지반조사가 수행되어 암반상태가 양호하다고 판정되면 최소 암반두께를 40m 이하로도 인정될 수 있다. 이 지침에서는 다른 육상터널에 비하여 해저터널에서는 훨씬 더 철저한 지반조사의 필요성을 강조하고 있다. 또한 기반암 심도와 노선에 따른 암질 평가를 위하여 광범위한 굴절법 탄성파탐사의 사용을 포함하고 있으며, 암질평가에는 직접적인 시추나 탄성파 토모그래피의 적용을 제안하고 있다. 경우에 따라서는 선상 시추결과로부터 암반두께의 조절이 요구될 수도

있지만, 이 방법은 많은 경우 비용 측면에서 효과적이지 않으며, 기반암의 심도를 전체적으로 항상 확인해줄 수도 없다. 지침에 의하면 막장 전방 암질과 사전 그라우팅의 필요성을 평가하고 또한 암반두께를 결정하기 위하여 선진 천공과 터널막장 전방 사전그라우팅을 엄격히 요구하고 있다.

그림 8에서 보는 바와 같이 터널 심도를 결정함에 있어서 연약대가 노선상에 존재할 경우, 낮은 심도의 노선은 더 넓은 연약대를 통과하게 된다. 이는 연약대 시공 비용과 터널이 길어짐에 따라 발생하는 비용간의 비교를 통하여 결정해야 할 것이다. 즉, 각각의 조건에 따른 굴착비용, 보강비용, 그라우팅 비용, 공사기간 등을 산출하고 이를 종합적으로 판단하여 전체 공사비용 및 공사기간에 유리한 노선을 선택해야 한다. 물론 이 경우에도 안정성은 필히 확보되어야 한다. 따라서 지반조사단계에서 연약대의 존재를 어느 정도 정확히 파악하는가가 매우 중요하다는 것을 의미한다.

그림 9에서 보는 바와 같이 해저터널의 지반조사결과가 실제 시공 도중에 마주치는 지반조건과 일치하지 않는 경우를 종종 경험할 수 있다. 아무리 광범위한 지반조사를 수행한다 할지라도 해저지반의 모든 특성을 규명할 수는 없으며, 예측치 못한 지반조건을 항상 만날 수 있다. 따라서 이와 같이 사전에 예측치 못한 불확실성과 위험요인을 내포한 해저지반을 최대한 안전하고

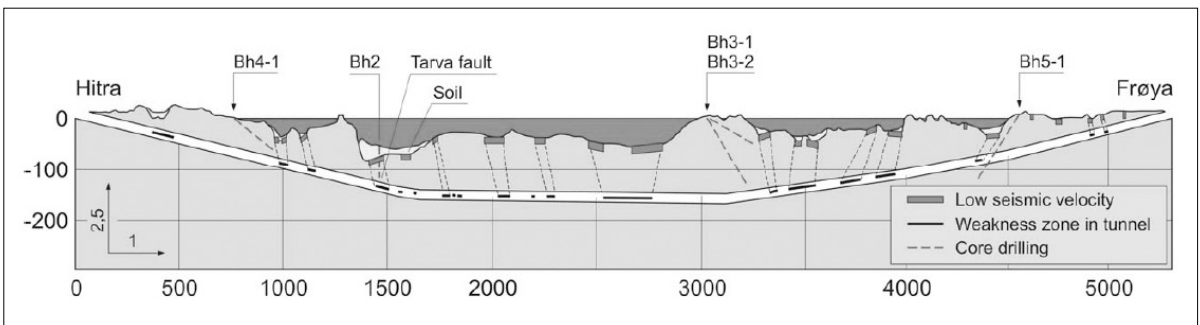


그림 9. 노르웨이 Froya 해저터널의 사전조사 대비 실제 지반조건

경제적으로 조사 및 시공하기 위해서는 다음과 같은 사항들이 필요하다.

- 1) 해저지반의 지질학적 복잡성과 해저터널 프로젝트의 특성에 맞추어 지반조사량과 범위를 결정하여야 한다.
- 2) 해저 지질과 지질구조에 관한 완벽한 이해와 확신을 가져야 한다.
- 3) 전체 시공기간동안 연속적인 조사를 수행하여야 한다.
- 4) 계획단계에서는 위험성과 불확실성에 관한 분석을 수행하여 최대한 이를 줄여야 한다.
- 5) 품질관리와 복잡한 프로젝트의 보증을 위한 독립적인 기준 패널을 최대한 활용하여야 한다.

노르웨이 해저터널의 붕괴 및 불안정 사례를 통하여 얻은 경험은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 1) 탄성과 굴절법 탐사에 의하면 3,500km/sec 보다 낮은 탄성과 속도지역은 잠재적인 안정성 문제를 유발할 수 있으므로, 터널 막장 전방으로의 Probe Drilling을 실시할 필요가 있다.
- 2) 일반적으로 대부분의 불안정 지역은 폭이 10~15m 내외로 넓지 않다.
- 3) 불안정 지역은 파쇄암과 점토광물의 혼합체로 구성되어 있으며, 팽창성 점토(Smectite)가 주로 문제의 원인이 되고 있다. 또한 방해석(Calcite) 또는 녹니석(Chlorite)의 성분이 문제의 원인이 되기도 한다.
- 4) 불안정 지역을 통한 해수 유입으로 시공 중에 어려운 문제를 유발한다.
- 5) 대부분의 경우 막장 자립시간(Stand-up Time)이 매우 제한적이다. Vardø 터널의 경우엔 0.5 시간 이내, Ellingsov 터널의 경우엔 2시간 이내의 막장 자립시간을 가졌다.

4. 결 언

현재 전 세계적으로 섬과 내륙, 내륙과 내륙을 연결하는 대규모 해저터널이 계획 중이거나, 시공 및 운영 중에 있다. 국내 또한 동북아의 통합 교통·물류체계 구축을 위하여 목포-제주간, 보령-안면도간, 한국-일본간 해저터널 프로젝트들이 언급되거나 계획 중에 있는 상황이다. 이러한 해저터널의 프로젝트를 안전하고 경제적으로 수행하기 위해서는 해저터널의 특성을 정확하게 이해하는 것이 매우 중요하다.

이에 국내 및 해외의 다양한 해저터널 프로젝트를 간략하게 소개하는 한편, 해저터널의 특성에 관하여 지반 조사를 중심으로 전반적으로 언급하였다.

해저터널은 육상터널과는 달리 조사, 설계 및 시공단계에 있어 많은 불확실성과 위험성을 가지고 있으므로, 프로젝트의 특성에 맞는 정밀하고 정확한 조사는 해저터널의 성공여부를 좌우할 수 있다. 따라서 계획단계에 철저한 문헌조사 연구 및 해저지형, 지질구조 등에 이해를 기반으로 해저지반 조사계획을 수립 및 수행하여야 한다. 또한 아무리 광범위한 조사를 수행하였다 할지라도 사전에 예상치 못한 지반조건을 마주칠 가능성이 있으므로, 불확실성과 위험성을 염두에 두고 설계 및 시공에 임하여야 한다.

사 사

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행하는 2007년도 건설핵심기술연구사업(과제번호 : 05건설핵심D10, 과제명 : 해저시설물 차폐기술개발)에 의해 연구비가 지원된 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 노르웨이 Oslofjord 해저터널의 설계경향
2. 해저시설물 차폐기술연구단, 2006, 해저시설물 차폐기술 개발 중간보고서(1차년도)
3. 건설교통부, 2006, 건설교통 R&D 혁신로드맵 보고서
4. Nilsen, B. and A. Palstrom, 2001, Sstability and water leakage of hard rock subsea tunnels, Modern tunneling science and technology, pp.497-502
5. Palmstrom, A. 1994, The challenge of subsea tunnelling, Tunnelling and underground space technology, Vol.9, No.2, pp. 145-150
6. Eisentein, Z.D. 1994, Large undersea tunnels and the progress of tunnelling technology, Tunnelling and underground space technology, Vol.9, No.3, pp. 283-292
7. Ikuma, Michitsugu. 2005, Maintenance of the undersea section of the Seikan Tunnel, Tunnelling and underground space technology, Vol.20, No.2, pp. 143-149
8. Blindheim, O.T. and B. Nilsen, 2001, Rock cover requirements for subsea road tunnels, Strait Crossing 2001, pp. 439-448