

국내외 해·하저터널 건설 사례 분석

최승범, 이수득, 김현우, 전석원*

Review of Subaqueous Tunneling Case Histories

Seung-Beum Choi, Sudeuk Lee, Hyunwoo Kim, Seokwon Jeon*

Abstract Recently, a few mega projects of subsea tunneling are completed or ongoing or under planning stage all across the world. In Korea, subsea tunnels connecting to Japan and China have been considered in the past decades. At the same time, subsea tunnels connecting to domestic islands were planned with preliminary design concepts. Development and improvement of indigenous techniques regarding subsea tunneling are essential in light of current technical level in Korea and their future impact on tunneling industry. In this paper, distinct features of subsea tunnel and construction trend of subaqueous tunnels are analyzed via case studies. Also, case studies about incidents related to subsea tunneling and required techniques to secure safety are presented.

Key words Subaqueous tunnel, Construction trend, Instances of subsea tunneling and incidents

초 록 최근 전 세계적으로 여러 건의 대규모 해저터널 건설 사업이 완료되었거나 진행 혹은 계획 중에 있다. 우리나라 역시 한중, 한일 해저터널에 대한 기본 구상이 이루어지고 있으며 동시에 국내 도서 지역을 연결하는 해저터널이 구상 단계에 있다. 국내 기술수준과 해저터널 건설이 갖는 파급효과를 고려할 때, 해저터널 관련 기술의 확보 및 개선이 요구되어진다. 이 논문은 사례연구를 통하여 해저터널이 갖는 특징과 국내외 해·하저터널 건설동향을 분석하였고 해저터널과 관련된 사고 발생 사례를 수집하여 이로부터 요구되는 관련기술에 대하여 정리하였다.

핵심어 해·하저터널, 건설동향, 시공 및 사고사례

1. 서 론

최근 전 세계적으로 보스포루스 해협(Bosphorus Strait), 지브랄타 해협(Gibraltar Strait), 베링 해협(Bering Strait) 등 대륙과 대륙을 연결하는 대형 해저터널 건설 사업뿐 아니라 육지와 섬을 연결하는 홍콩 크로스하버터널(Hong Kong Cross-Harbor Tunnel), 유로터널(Euro Tunnel), 만(灣)을 연결하는 중국 하문 상안(翔安)터널(Xiamen Xiang'an Tunnel), 청도 교주만(膠州灣) 터널(Jiaozhou Bay Tunnel) 등의 건설 사업이 완공 혹은 진행, 계획

중이다. 국내에서도 한중, 한일 해저터널과 같은 대형 프로젝트에 대한 기본 구상이 이루어진 바 있다. 한반도의 지리적 조건 및 주변 국가와의 관계를 고려할 때, 초장대 해저터널 건설 기술을 확보할 필요가 있으며 이를 확보했을 시 동북아의 물류이동 및 교류 증가를 통한 경제적, 문화적 파급효과를 기대할 수 있다.

해외의 경우 다수의 해저터널 시공 사례가 보고된 바 있다. 특히 노르웨이, 미국, 일본, 영국 등은 다수의 해·하저터널 건설을 통해 관련 정보 및 기술에 대한 노하우가 축적되어 있으며 연장 5 km 이상의 초장대 해저터널 건설 경험 및 기술도 보유하고 있다.^{1,2)} 국내에서는 가덕해저터널, 분당선 한강해저터널, 울릉 복합화력 발전소 취배수로터널, 보령-태안 터널 등이 완공 혹은 시공 중에 있으나 선진국에 비하여 건설 경험이 부족한 상황이며 특히 초장대 해저터널의 경우 선행 연구 및 기술개발이 미진한 실정이다.

본 논문에서는 해저터널의 특징과 그에 따른 고려사

Received: Mar. 28, 2014

Revised: Apr. 22, 2014

Accepted: Apr. 22, 2014

*Corresponding Author: Seokwon Jeon

Tel) +8228808807, Fax) +8228718938

E-Mail) sjeon@snu.ac.kr

1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, 151-744, Korea

향을 기술하고 국내의 해저터널 건설 동향을 소개하고자 한다. 또한 해저터널 건설 시 발생한 트러블 사례를 소개하고 그 유형 및 대처방안을 기술하고자 한다.

2. 해·하저터널 건설현황 및 동향분석

2.1 굴착 공법별 분류

해·하저터널 건설현황 및 동향분석을 위하여 전 세계 275개소 해·하저터널 건설 사례에 대한 문헌을 수집하였다. 기록상 가장 오래된 Thames 터널부터 현재 시공 중인 터널 가운데 관련 자료를 입수할 수 있는 터널을 모두 포함했으며 수집된 문헌 자료에는 철도, 도로터널 뿐만 아니라 송수관, 송유관 등의 터널이 포함되어 있다.

해·하저터널 굴착 공법은 침매공법, NATM 공법, TBM 공법, 개착공법으로 분류할 수 있다. 파이프형 구조물을 부력에 의해 띄워 연결하는 해중터널의 경우 실제 시공 사례는 찾을 수 없었으나 국내외에서 설계, 제작 및 시공, 유지관리 기술에 대한 일부 연구가 진행되고 있다.³⁾

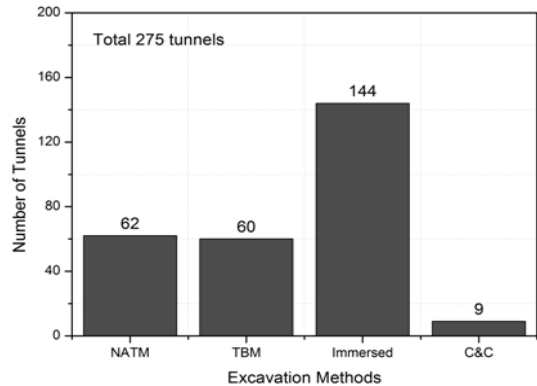
Fig. 1에 정리된 바와 같이 수집된 전체 문헌자료 중 침매공법에 의한 해·하저터널이 144개소(52.4%)로 가장 많았으며 그 뒤로 NATM 공법, TBM 공법이 각각 62개소(22.5%), 60개소(21.8%)인 것으로 조사되었다.

대륙별 분류 결과, 137개소(49.8%)의 해·하저터널이 유럽에 존재하고 있으며 아시아, 북미에 각각 74개소(26.9%), 56개소(20.4%)의 해·하저터널이 조사되었다. 각 대륙 내에서도 침매공법에 의한 해·하저터널 굴착 사례가 가장 많았다. NATM 공법에 의한 터널 굴착의 경우 대부분이 유럽, 특히 노르웨이에 집중되어 있으며 TBM 공법에 의한 터널 굴착은 24개소로 아시아에 가장 많이 분포하고 있다.

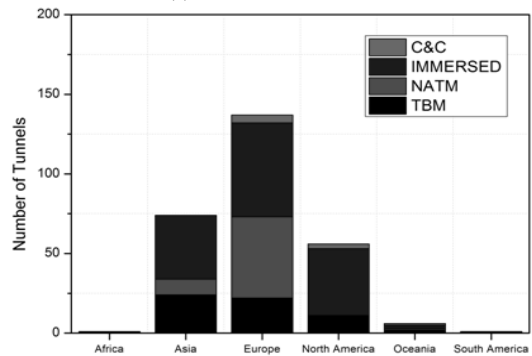
굴착방법에 따른 분류와 다르게 굴착방법별 누적 터널 연장은 NATM 공법이 321.7 km로 가장 길었으며 그 뒤로 TBM 공법, 침매 공법이 각각 247.4 km, 167.4 km로 조사되었다. 따라서 단일 해·하저터널별 평균 터널 연장은 NATM 공법에 의한 터널이 가장 긴 것을 알 수 있다.

2.2 시대별 분류

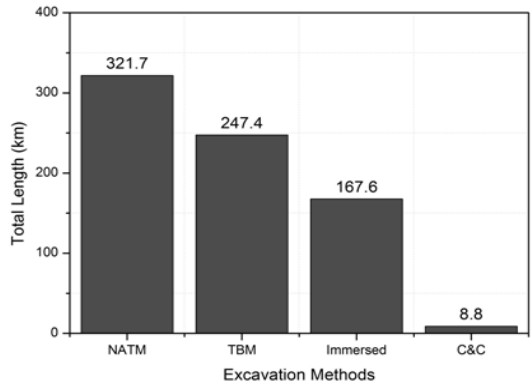
세계 최초의 하저터널은 1843년 개통된 영국의 Thames 터널로 기록되어 있다. 재래 인력식 shield 공법으로 굴착된 이 터널은 연장이 약 350 m인 도로터널이다. 반면 최초의 해저터널은 1942년에 개통된 일본의 Kanmon railway 터널이며 약 3600 m의 터널연장을 재래식 TBM으로 굴착했다.



(a) Number of tunnels



(b) Distribution by continent



(c) Total length of tunnels

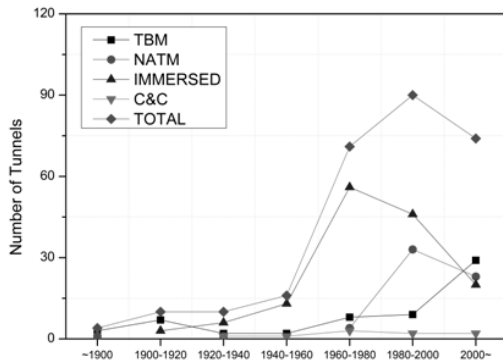
Fig. 1. Classification of 275 subaqueous tunnels by construction method

시대별 분류에서 최근 해·하저터널의 건설사례가 지속적으로 증가하고 있으며 1980년부터 2000년 사이 20년 기간 동안 90건의 해·하저터널이 건설된 것으로 조사되었다(Table 1과 Fig. 2 참조). 침매공법의 경우 1960~1980년 사이 가장 많은 시공사례가 보고되었고 그 이후로 점차 시공 사례가 감소하고 있다. NATM 공법은

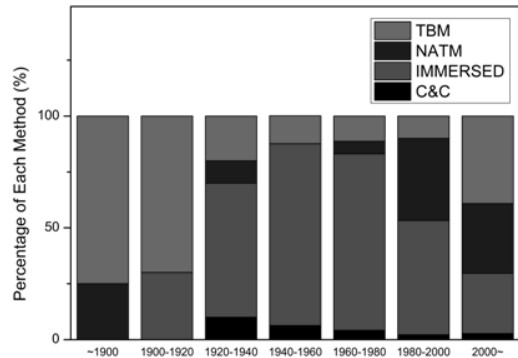
Table 1. Number and length of subaqueous tunnels by time period

Time period	The number of subaqueous tunnels					Length of subaqueous tunnels (km)				
	IMM.	NATM	TBM	C&C	Total	IMM.	NATM	TBM	C&C	Total
~1900		1	3		4		7.0	3.5		10.5
1900~1920	3		7		10	1.2		13.0		14.2
1920~1940	6	1	2	1	10	7.3	3.2	4.6	1.7	16.8
1940~1960	13		2	1	16	12.7		7.1	2.1	21.9
1960~1980	56	4	8	3	71	54.5	32.6	34.0	2.0	123.1
1980~2000	46	33	9	2	90	61.9	173.5	78.6	1.9	315.8
2000~	20	23	29	2	74	30.0	105.3	106.6	1.1	238.7
Total	144	62	60	9	275	167.6	321.7	247.4	8.8	741.0

* IMM : Immersed Method, NATM : New Austrian Tunneling Method
TBM : Tunnel Boring Machine C&C : Cut and Cover



(a) Number of tunnels



(b) Type of each method

Fig. 2. Classification of subaqueous tunnels by time period

1980~2000년 사이에 가장 많은 사례가 보고되었는데 이중 대부분은 1980년 Slemmestad 터널을 시작으로 건설된 일련의 노르웨이 해저터널이다. 조사기간 초기에 집계된 TBM 적용 사례는 Thames 터널과 같은 shield 공법을 포함하고 있다. 따라서 초기에 높은 시공비용을 보이지만(Fig. 2-(b)) 이는 지금과는 다르게 인력에 의한 굴착으로 볼 수 있다. 현대적인 의미의 기계화 TBM 공법의 경우, 1950년대 이후 미국과 일본에 적용되기 시작한 것으로 파악되며 이때부터 꾸준하게 적용사례가 보고되고 있다.

Table 1에는 해·하저터널의 건설건수 및 연장을 시대 별로 정리하였다. 수집된 문헌자료에 전체 터널연장과

해·하저 구간 연장의 구분이 명확하지 않은 경우가 많아 전체 터널 연장을 기재하였다.

2.3 터널 연장별 분류

세계 최장 해저터널은 일본의 Seikan 터널로 전체 연장이 약 53.8 km이며 해저구간이 가장 긴 터널은 유로 터널로 50.4 km의 총 연장 중 해저 연장이 약 37.9 km이다. 수집된 문헌자료를 터널 연장에 따라 분류하면 Fig. 3과 같다.

연장이 1 km 미만인 해·하저터널의 경우 침매공법에 의한 굴착이 전체의 약 83.7%로 수집 자료의 대부분을 차지한다. NATM, TBM, 개착공법의 시공 사례는 비슷

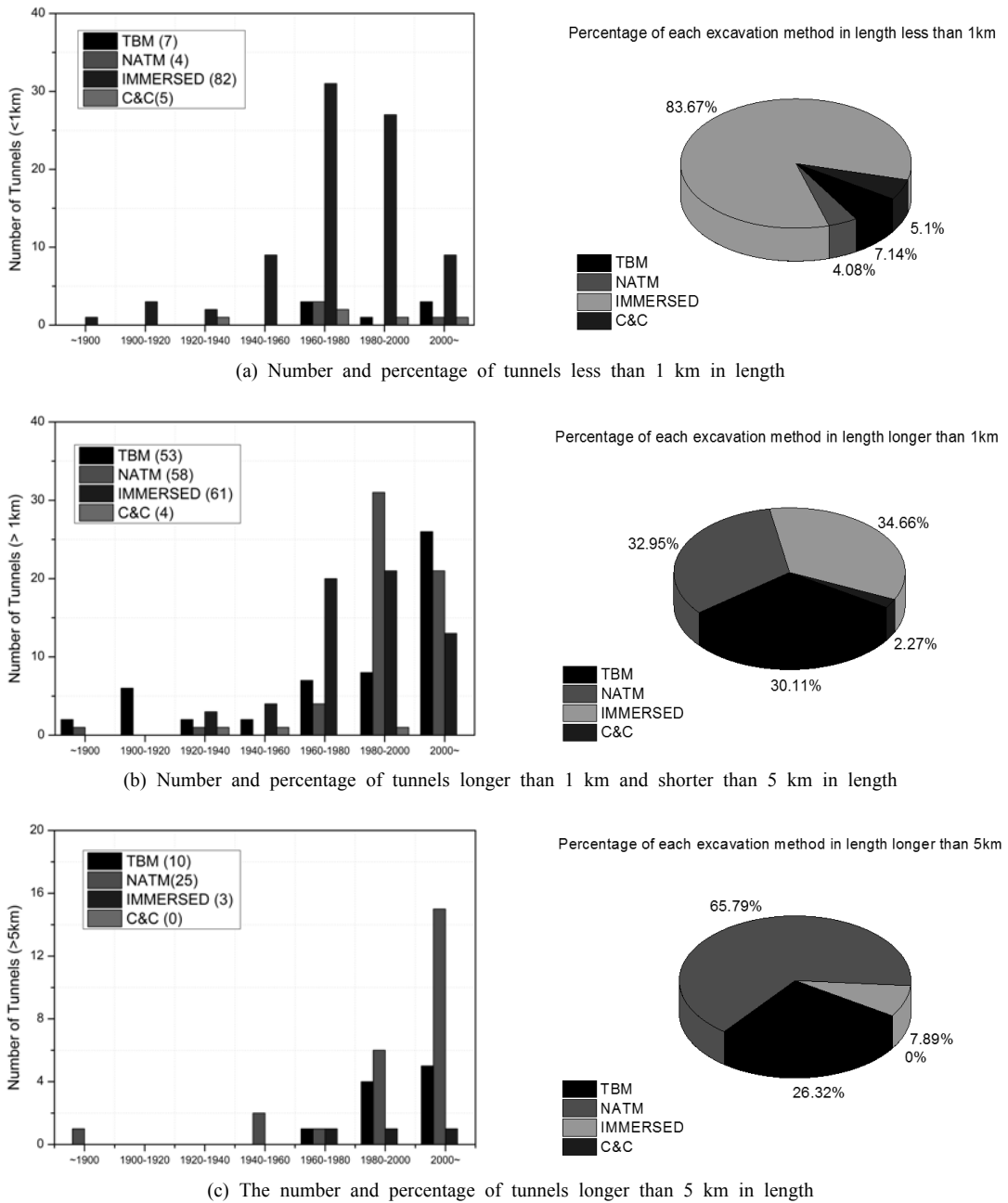


Fig. 3. Classification of subaqueous tunnels by length

한 수준으로 조사되어 연장이 짧은 터널의 경우 침매터널 건설이 선호되었음을 확인할 수 있다.

연장 1 km 이상 5 km 미만 장대터널의 경우 침매공법, NATM, TBM 공법의 순서로 조사되었으나 그 비율은 비슷한 수준이다. 특히 1980년대부터 노르웨이를 중

심으로 NATM 공법의 적용 사례가 급증했으며 TBM 공법의 적용 역시 꾸준히 증가하는 추세를 확인할 수 있다.

연장 5 km 이상의 초장대 터널의 경우 NATM 공법의 적용이 65.8%로 가장 많았으며 그 뒤로 TBM, 침매

공법이 각각 26.3%, 7.9%를 차지하는 것으로 조사되었다. NATM 공법으로 굴착된 초장대 터널 25개소 중 노르웨이 소재 터널이 16개소로 가장 많았으며 TBM 굴착 터널은 10개소 중 5개소가 중국, 일본 등 아시아에 분포하고 있다.

상술한 것과 같이 터널 연장이 짧은 해·하저터널의 경우 침매공법 적용이 선호되었으며 연장이 길어질수록 NATM, TBM 등 지중굴착 공법 적용이 선호되는 것으로 파악되었다.

2.4 국내 해·하저터널 건설동향

국내 최초의 해저터널은 1932년에 완공된 충무 해저터널로써 개착공법이 적용되었고 개통 당시 인마와 차량이 통행하였으나 1967년 이후 차량통행은 금지되었다. 최초의 하저터널은 서울지하철 5호선 한강 하저터널로 기록되어있다. 1996년 완공되었으며 NATM 공법을 적용한 연장 1,288 m의 단선병렬 터널이다.

국내의 경우 해저터널보다 한강, 낙동강 유역의 하저터널 건설사례가 많으며 현재 시공, 설계 중인 5개의 터널을 포함해서 총 13개소의 해·하저터널이 조사되었다. 적용된 공법은 NATM이 5건, TBM이 6건, 침매터널이 1건, 개착공법 1건으로 지중굴착 공법 적용 사례가 많다(Table 2).

국내에서는 해·하저터널의 시공 사례가 그다지 많은 편은 아니나 앞으로 그 수요는 꾸준히 증가할 것으로 기대된다. 도심지 교통 수요를 만족하기 위한 지하철 노선 연장이나 새로운 급행열차(예, GTX) 시스템의 신규 공사 시 하저 통과구간이 발생하기 때문이다. 또한 가덕터널과 같이 섬과 육지를 연결하거나 만(灣)을 가로질러 교통효율을 증대시키기 위한 목적의 해저터널 수요가 증가할 것으로 보인다.

국내에서는 해·하저터널 공사 시 물의 유입에 따른 시공 및 유지·보수 안정성 확보를 위하여 공사방법의 선정에 신중을 기하여 왔으며 2000년대 이전에는 NATM 공법이 선호되었다. 과거 TBM 공법은 장비 제작과 설계를 온전히 외국기술에 의존하고 있어 설계 시 복합 지층이 포함된 국내 지반조건을 설계에 충분히 반영하지 못하여 시공 과정에서 많은 트러블을 경험하면서 공기와 공사비가 예상치를 벗어난 것과는 무관하지 않은 것으로 판단된다. 그러나 지하철 터널과 전력구 공사에서 TBM 터널에 대한 많은 경험이 축적된 이후 해·하저터널 공사에서는 시공 안정성이 우월한 TBM 굴착에 대한 선호도가 커지는 것으로 파악된다. 다만 아직도 국내에서는 NATM 공사의 축적된 경험이 TBM 터널에 비하여 크고, 고도의 공사비 절감 등의 이유로 신규 해·하저터널 공사의 경우도 NATM으로 시공되는 바 있다.

Table 2. Subaqueous tunnels in Korea

Tunnel	Year of completion	Construction method	Length (m)	Usage	Remarks
충무 해저터널	1932	C&C	461	Pedestrian	First subsea tunnel in Korea
서울지하철 5호선 한강 하저터널	1996	NATM	1288	Metro	
마산만 해저 횡단터널	2000	TBM	1354	Road	
금호강 하저터널	2001	NATM	272	Metro	
부산지하철 230공구 하저터널	2002	TBM	420	Metro	
부산지하철 325공구 하저터널	2009	NATM	336	Metro	
분당선 한강 하저터널	2009	TBM	845	Metro	
가덕터널	2010	IMMERSED	3665	Road	First immersed tunnel in Korea
신분당선 한강 하저터널	2012	TBM	1502	Metro	
대곡-소사 한강 하저터널	-	TBM	2690	Metro	
낙동터널	-	TBM	3080	Railway	
울현터널	-	NATM	5101	Railway	
보령터널	-	NATM	6927	Road	Longest subsea tunnel in Korea
울촌 복합화력발전소 취배수로터널	-	TBM	1560	Water pipe	

3. 해저터널 관련 안정성 문제 및 사고 발생사례

해저터널 관련 주요 안정성 문제는 단층, 연약대 굴진 시의 붕락사고와 이를 통한 대규모의 해수유입사고 등이다. 해저터널의 경우 현장 조건에 의한 제약으로 지반조사 결과에 불확실성이 높다. 또한 해수유입사고가 발생하면 고압의 해수가 무제한으로 유입되기 때문에 대규모 사고로 이어질 가능성이 높다.

수집된 문헌자료 중 해저터널 관련 안정성 문제를 정리하고(Table 3) 그 중 대표적인 사례에 대해 원인 및 보강 방법에 대하여 정리하였다.

3.1 일본 Seikan 터널

Seikan 터널은 NATM 공법이 적용된 세계 최장대 해저터널로 1988년 완공되었다. 최대 수심이 140 m에 달하고 지압까지 고려하여 최대수압 2.4 MPa이 고려되었

으며 기반암 상태가 불량하여 시공 중 1969~76년에 걸쳐 총 4차례에 걸친 해수유입 사고가 발생했다. 모두 단층대 통과 시 사고가 발생했으며 복구하는데 최소 5.4개월에서 최장 11.6개월이 소요되었다.

4차례에 걸친 해수유입 사고 중 가장 규모가 큰 사고는 1976년에 발생했다. 분당 유입량이 70,000 liter/min에 달하는 급격한 유입수 증가로 3,015 m의 서비스 터널과 1,459 m의 본선 터널이 침수되고 터널의 75m 가량이 붕괴되었다. 침수 당시 작업공간에 간이뎀을 설치하고 긴급배수를 실시하여 유입량을 안정화 시킨 후 그라우팅을 실시하고 최종적으로 우회터널을 굴착하여 단층대를 통과하였다.⁴⁾

완공 후 터널 유지관리 차원에서 가속도계 8개와 지진계 4개를 설치하여 지속적인 모니터링을 수행하였다. 개통 이후 2002년까지 네 번의 큰 지진이 발생하였고 이로 인한 안정성 문제가 발생하였다. 지진 발생 시 육

Table 3. Major incidents of subsea tunnel

Tunnel	Excavation method	Incident type	Support method	Remarks
Seikan (Japan)	NATM	Water inrush, face collapse	Emergency pumping / temporary dam cement grouting / bypass tunnel	During construction
		Increment of water inflow		Earthquake induced, after completion
Vollesfjord (Norway)	NATM	Collapse after water filling		Water supply tunnel
Vardø (Norway)	NATM	Cave in	Casting steel shield / cement grouting install pile of rock	Occurred twice
Ellingsøy (Norway)	NATM	Cave in	Concrete plug / cement grouting	
Karmsund (Norway)	NATM	Cave in		
Slemmestad (Norway)	NATM	Rock fall, cave in		
Bjørøy (Norway)	NATM	Instability	Cement grouting / shotcrete pumping	Unexpected fault zone
Oslofjord (Norway)	NATM	Instability	Bypass tunnel / ground freezing	During construction
		Rock fall	Repair lining / additional support	After completion
Atlantehav (Norway)	NATM	Cave in	Shotcrete / concrete grouting concrete plug	Unexpected weakness zone
Nordkapp (Norway)	NATM	Instability	Additional support	Unexpected weakness zone
Storebaelt (Denmark)	TBM	Face collapse, Water inrush	Emergency pumping / cement grouting dewatering	
Paulel (France)	NATM roadheader	Water inrush, seabed subsidence	Mask wall / cement grouting ground treatment	Nuclear power plant gallery

상 및 해저구간 모두 터널 내부로의 물 유입량이 증가하였는데 특히 해저 구간의 단층대 부근에서 유입량 증가폭이 컸다. 해당 구간은 시공 당시에도 해수유입 문제가 발생했던 구간으로 화산암 암맥이 위치한 지점이었다. 이 사례에서 알 수 있듯이 취약 지반의 경우 완공 후에도 지진 발생 시 해수 유입량이 증가할 가능성을 배제할 수 없다.⁵⁾

3.2 노르웨이 Oslofjord 터널

노르웨이의 Oslofjord 터널은 NATM 공법으로 2000년에 완공된 도로터널이다. 총 연장 7.4 km 중 약 2 km가 해저에 위치하며 기반암은 대부분 편마암이나 암질은 불량한 편이다. 터널 단면적은 79 m², 최소토피고 32 m, 최대수심은 130 m이며 굴착 시뿐만 아니라 완공 후에도 안정성 문제가 보고되었다.

해저 기반암의 연약한 부분이 오랜 기간 계곡 형태로 침식되면서 퇴적층으로 채워져 있는 경우 사전조사 단계에서 퇴적층의 탄성과 속도가 높게 나타나 기반암과 퇴적층의 경계를 구분하는데 어려움이 있다. Oslofjord 터널은 이러한 연약대 구간을 통과하도록 계획되었으며 사전 지반조사 시 이를 탐지하지 못하여 결과적으로 우회터널을 건설하여 통과하였다. 이 위험지반은 투수성 크고 수압이 높아 그라우팅 조절을 통한 수압 안정화가 불가능하여 동결공법을 적용한 것으로 보고되었다.⁶⁾

2000년에 완공된 Oslofjord 터널은 완공 후 3년 반 이상 문제없이 운영되었으나 2003년 12월 터널 내부로 갑작스런 낙반사고가 발생했다. 4 m³의 파쇄암이 터널 내부로 유입되었고 조사 결과 터널 내부 라이닝 바깥지역에 총 40 m³의 낙반이 발생한 것으로 파악되었다. 총 3개월간 락볼트, 그라우팅 등 추가 보강작업을 수행한 후 재개통되었다. 사고 지역은 급경사의 점토함유 이상대가 존재했으며 팽윤암이 최대 0.55 MPa에 달하는 스펙타이트가 다량 포함되어 있어 사고를 유발한 것으로 추정되었다.⁷⁾

3.3 노르웨이 Vardø 터널

노르웨이의 Vardø 터널은 1982년 NATM 공법이 적용된 도로터널로 총 연장 2.8 km 중 약 1.7 km가 해저에 위치한다. 기반암은 셰일과 사암이며 터널 단면적은 53 m², 최소토피고 28 m, 최대수심은 68 m이다.

두 차례에 걸쳐 붕락사고가 발생했다. 첫 번째 붕락사고는 기반암 심도 35 m인 2500 station 부근이며 암질이 매우 불량한 구간이었다. 두 번째 사고는 기반암 심도 45 m, 수심 20 m인 2090 station 부근이며 단층대를 통과할 당시 발생했다. 두 곳 모두 암질이 극히 불량하

고 탐지공 천공 결과 파쇄정도가 심하며 점토광물이 포함되어 있었다. 탐지공을 통한 해수 유입량은 10 liter/min이며 자립시간은 약 30분으로 추정되었다. 발파 후 천장부에서 붕락이 시작되어 casting steel shield와 압성토로 조치한 후 콘크리트 플러그로 작업공간을 봉쇄하고 보강 작업을 실시하였다.⁸⁾

3.4 노르웨이 Ellingsøy 터널

노르웨이의 Ellingsøy 터널은 1987년 NATM 공법이 적용된 도로터널로 총 연장 3.5 km이다. 기반암은 편마암으로 구성되며 터널 단면적은 68 m², 최소토피고 34 m, 최대수심은 137 m이다.

기반암 심도 약 45 m, 수심 70 m인 9900 station 부근에 단층대가 존재했으며 이를 통과할 시 막장면 붕락사고가 발생했다. 탐지공 해수유입량은 30 liter/min이며 자립시간은 2시간 미만이었다. 발파 직후 막장면 붕락이 시작되어 슛크리트를 분사했으나 점토 섞인 고압의 해수 유입 때문에 안정화되지 않았고 24시간 동안 붕락이 지속되어 최종적으로 막장면 상부 8~10 m 정도가 붕락되었다. 작업공간을 콘크리트 플러그로 봉쇄한 후 보강작업 시작하였으며 단층대를 포함한 20 m 구간을 5주에 걸쳐 굴진하였다.⁸⁾

3.5 덴마크 Storebaelt 터널

Storebaelt 터널은 TBM 공법으로 굴착된 총 연장 7.4 km의 해저터널이다. 단선병렬의 철도 터널을 4개의 TBM으로 굴착했으며 기반암 두께와 수심 조건에 따라 굴착 중 최대 0.63 MPa의 수압이 작용했다. 빙력토(glacial till)와 이회토(chalk marl)로 구성된 현지의 복잡한 기반암 조건을 고려하여 4기 모두 EPB-TBM을 선정했으나 빈번한 커터 마모로 인한 TBM 가동률 저하, 막장면 불안정으로 인한 다수의 붕괴사태가 보고되었다.

1991년 개방형 모드에서 TBM 정비작업을 수행하는 도중 막장면 붕괴 및 180,000 liter/min의 갑작스런 해수유입이 발생하여 TBM 내부 및 터널이 침수되는 사고가 발생했다. 유입수를 긴급배수하고 바지선을 이용해 해저면에서 콘크리트 및 모르타르를 주입해 안정화 작업을 진행했으나 복구하는데 8개월 이상이 소요되었다.

비슷한 해수유입 및 막장면 붕괴사고가 15차례 더 발생하자 'Moses project' 라 명명된 해저지반 지하수 배수 작업을 시행했다(Table 4). 터널 진행방향을 따라 총 6개의 바지선, 43개의 배수공을 통해 시간당 3400 m³의 지하수를 배수했으며 이를 통해 지하수압을 0.3 MPa 이하로 유지하여 해수유입 및 막장면 붕괴를 방지했다.⁹⁾

Table 4. Project Moses data (Biggart & Sternath, 1996)

Pump wells :	
Number	43
Diameter	300 mm
Depths	35 - 115 m
Yield	15 - 120 m ³ /h
Total nominal capacity	3400 m ³ /h
Pumps:	
Type	Grundfoss
Power rating	7.5 - 55 kW
Barges :	
Number	6
Spare	1
Size	36 m long 9 m wide 2.5 m deep
Diesel generator sets :	
Number	6
Spare	1
Power rating	455 kW
Piezometer wells :	
Number	12
Type	Well with piezo-resistive silicon sensor transducer

3.6 프랑스 Paluel galleries

Paluel galleries는 프랑스 Paluel 원자력 발전소의 냉각수로 터널로 총 4.2 km의 해저터널이다. 총 4개의 터널로 구성되었으며 최소 토피고는 30~50 m, 기반암은 강도가 매우 낮아 NATM과 roadheader를 혼용하여 굴착하였다.

몇 건의 해수유입사고가 보고되었으며 그 중 가장 규모가 큰 사고는 galley No. 2의 PM777 구간이다. 선진 탐지공 굴착 결과 약 25,000 liter/min에 달하는 해수 및 유사가 유입되어 작업장을 폐쇄하고 폐쇄구간 및 인근 공동에 그라우팅 재료를 주입하여 지반을 안정화시킨 후 굴진하였다.¹⁰⁾

4. 해저터널 건설 시 고려사항

해저터널 건설은 육상터널과 비교하여 여러 가지 측면에서 차이점이 있으며 상기 사고사례에서 알 수 있듯이 이러한 차이점을 인지하고 대비하는 것이 대규모 사고를 예방하는 방법이다. 해저터널의 설계, 시공, 유지관

리 시 고려해야 할 특징을 정리하면 다음과 같다.

4.1 사전 지반조사의 어려움

해저터널 노선의 대부분이 해저에 위치하여 정밀한 시추 및 물리탐사 실시에 어려움이 있으며 그 조사결과 또한 상대적으로 불확실성이 높다.

해저터널의 경우 일반적으로 광범위한 지역에 대하여 탄성파와 같은 간접적 조사방법이 선행되며 이로부터 특정화된 몇몇 지점에 대하여 시추 조사와 같은 직접적인 조사가 수행된다. 따라서 계획 및 설계단계에서 자세한 지질정보의 획득이 육상터널의 경우에 비하여 어렵고 비용이 많이 발생한다. 상기 사고 사례 중 다수가 설계단계의 사전 지반조사를 통해 자세히 파악되지 않은 이상대를 통과할 때 발생했으며 일부의 경우 시공 중 탐지공 조사를 통해서도 이상대를 특정화 시키지 못한 사례가 있다. 지질 이상대 뿐만 아니라 기반암의 초기응력, 불연속면 분포에 대한 사전 정보 역시 극히 제한적이기 때문에 적용된 공법별로 시행 가능한 막장면 매핑, 전방 탐사 및 탐지공 천공 등의 시공 중 지속적이고 체계적인 점검, 보완이 필수적이다.

4.2 해저지형, 해저퇴적층의 영향

해저터널 노선 결정 시 터널 연장을 최소화하기 위하여 해협과 같은 지형을 통과하는 최단 노선이 결정될 가능성이 높다. 그러나 이러한 지형은 지질학적으로 대부분 연약한 지반으로 분류된다. 또한 육상터널과는 다르게 해저터널 기반암은 직접 노출되어 있는 경우가 드물고 두꺼운 상부 퇴적층이 형성된다는 특징이 존재한다. 이러한 조건들은 사전 지질조사 결과의 불확실성을 높이는 요인에 해당한다.

퇴적층의 종류와 형태에 따라 지질 이상대를 통한 해수유입 여부가 결정되기도 한다. 노르웨이의 Alesund 터널의 경우 상부 퇴적층으로 인해 해수유입이 감소했으나 Godøy 터널의 경우는 퇴적층 두께가 70 m 임에도 불구하고 불연속면을 통해 해수가 유입된 사례가 보고되었다.^{7,11)} 또한 단층대에 포함된 점토광물은 탐지공 천공을 통한 해수유입 결과에 영향을 미치며 터널 시공 후에도 안전문제를 일으킬 수 있으므로 이를 고려한 장기적인 안정성 해석이 필요하다.

4.3 고압의 해수유입

해저터널의 안정성 문제 중 가장 유의해야 할 점은 고압의 해수유입 사고이다. 상술한 것처럼 해저터널 관련 사고는 대부분 연약대를 통과할 때 발생하지만 이를 사전 지반조사 및 탐지공 천공으로 확실히 예측하기 어

렵다. 이러한 연약지반 통과 시 해수유입 사고가 발생한다면 다량의 해수가 고압으로 유입되므로 대형사고로 이어질 가능성이 높다. 따라서 이에 대한 예측기술과 사고 발생 시 신속하고 안전하게 대처할 수 있는 기법 개발이 필수적이다.

또한 고수압이 작용하는 경우 지반 물성 및 거동에 영향을 미치므로 터널의 장·단기적 안정성 해석에 이를 반영할 필요가 있으며 해수의 염분으로 인하여 지질조사 장비, 시공 장비, 지보재 등의 내부식/내염해 기술이 요구된다는 점도 육상터널과의 차이점 중 하나이다.

5. 해·하저터널 사례검토를 통한 기술적 특징과 과제

사례검토를 통하여 파악한 해·하저터널의 기술적 특징과 요구되는 기술적 과제를 정리하면 다음과 같다.

1. 설계단계에서부터 지질 이상대를 파악할 수 있는 정밀 해저 지반·지질조사 기술이 요구된다. 해저 환경의 특성 상, 작간접적인 지질조사 모두 수행이 제한적이고 많은 비용이 소요되며 결과에 불확실성이 높다. 따라서 정밀한 지구물리탐사 기법의 개발, 방향 시추 등 시추기술의 개발 및 가이드라인 제시, 지형·지질구조 생성 메커니즘 분석, 선구조 분석 등의 이론적인 접근을 통한 보완기법의 개발 등이 필요하다.
2. 국내의 경우, 심해저 환경에 적용 가능한 지반조사 기술개발이 요구된다. 앞서 언급한 지반조사의 어려움은 조사 심도에 비례한다고 볼 수 있다. 국내 해저 지반조사 분야의 경우 대부분이 천해 환경에 국한되어 있고 고심도 해저 지반조사 시장은 거의 전무한 상태이다. 국내 심해저 지반조사는 정부출연 연구기관 단위의 학술조사 혹은 자원탐사 목적으로 수행되어 선진국에 비하여 경험이 부족하며 조사장비와 해석 프로그램 역시 전반적으로 외국 기술에 대한 의존도가 높다는 점 또한 개선이 필요한 사항이다.
3. 시공 중 막장면 전방 탐지를 통한 위험요인 예측 및 평가기법이 요구된다. 이는 사전 지반조사의 불확실성을 보완할 수 있는 가장 효율적인 기법으로 알려져 있다. 터널 막장면을 직접 천공하는 프로우브 드릴링(Probe drilling) 혹은 막장면에서의 국부적인 물리탐사 등이 활용되고 있으며 이를 통하여 위험구간 및 함수대 분포를 사전 예측할 수 있다.
4. 해저터널에 적합한 위험도 분석, 관리기법이 요구된다. 위험도 관리기법은 해당 공사의 특성이 반영되어 결정되므로 해저터널의 특징을 고려한 관리기법의 개발이 필요할 것으로 판단된다. 국내에서는 시

공 중 다양한 지반조건에서 발생 가능한 위험요인 규명 및 대책법 수립을 위한 위험 시나리오 관리기법이 제안된 바 있다.¹²⁾

5. 해저지반 환경에 적합한 성질의 지질조사, 시공 장비 및 지보재 개발이 요구된다. 지질조사 장비, 시공 장비 모두 염수에 노출되므로 내염해 성능이 보장되어야 하며 특히 대심도 지질조사 장비의 경우 내압 성능 역시 요구된다. 또한 세그먼트, 슛크리트 등의 지보재 역시 내염해/내부식성이 요구되며 관련 기준의 정비가 필요할 것으로 사료된다.
6. 신속하고 안전한 차수 및 보강 공법개발이 요구된다. 함수대 통과 시 차수 방안 중 하나로 급속 동결공법에 대한 연구가 활발히 진행 중이며 국외에서는 일본, 노르웨이를 중심으로 다수의 적용사례가 존재하나 국내에서는 아직 터널 현장에 대한 적용사례가 없다.¹³⁾ 또한 대심도 해저터널의 경우 고압의 해수유입을 차단할 수 있는 그라우팅, 슛크리트 공법의 개발과 돌발 용수 및 이상 누수 발생에 따른 차폐설비 시스템의 개발도 요구된다.
7. 현재 논의 중인 한일, 한중 해저터널 같은 초장대 해저터널의 경우 그에 적합한 방재, 환기시스템의 개발이 요구된다. 해저터널은 제반조건에 따라 수직갱의 설치가 제한적이므로 연장을 고려한 배기, 환기 시스템 및 화재 시 대응 시스템이 필수적이다. 또는 수직갱을 설치하기 위한 인공섬의 시공도 검토할 필요가 있다고 판단된다.
8. 상기 내용 외에 고수압의 영향이 반영된 합리적인 설계관련 지반정수 산정 기법 및 장·단기적 터널 안정성 해석 기법, 내진설계 기법, 완공 후 지속적인 안전 관리기법 등의 개발이 요구된다.

6. 결론

전 세계적으로 대형 해저터널 프로젝트의 계획 및 시공사례가 꾸준히 보고되고 있다. 국내에서도 몇몇 대형 프로젝트가 논의되고 구체화되는 현 시점에서 관련 시장 및 기술동향을 파악하기 위하여 국내외 해저터널 및 하저터널 문헌자료를 수집, 분석하였다.

전 세계 26개국 275개의 해·하저터널 사례를 분석한 결과 현재까지 침대공법을 적용한 사례가 144개소로 가장 많았다. 대륙별 분포는 유럽, 아시아, 북미 순으로 집계되었다. 해·하저터널 건설 사례는 시간에 따라 지속적으로 증가하고 있다. NATM 공법의 적용은 경암의 분포가 우세한 노르웨이를 중심으로 유럽에서 1980년대 이후 지속적으로 증가 추세이며 TBM 공법의 적용

역시 꾸준히 증가하고 있다. 터널 연장에 따라 분류한 결과 연장이 1 km 미만인 해·하저터널은 침매공법에 의한 건설이 선호되었으나 반대로 1 km 이상의 장대터널, 5 km 이상의 초장대터널의 경우 NATM, TBM 공법 등 지중건설 사례가 압도적임을 확인할 수 있다.

또한 해저터널 시공, 운영과 과정에서 안전문제가 발생한 사례와 그 원인, 대처방안을 소개하였다. 터널 천장부 및 막장면 붕락사고, 해수유입 사고 등 대부분이 연약 지반을 통과할 때 발생했으며 완공 후 운영 중에도 안전사고가 다수 발생한 것으로 조사되었다.

이러한 사례조사를 통하여 확인한 해저터널의 특징과 요구되는 기술적 과제에 대하여 기술하였다. 육상터널과는 다른 해저터널의 특징은 사전 지반조사의 어려움, 육상터널과는 상이한 해저지형의 구성 및 형태, 고수압의 작용 등으로 요약된다. 안전사고를 방지하기 위하여 지질 이상대 탐지기술, 전방탐지 및 탐지공을 통한 위험도 예측기술, 사고 발생 시 차수 및 보강 기술, 완공 후 유지관리 기술 등이 요구된다.

사 사

본 연구는 국토교통부 건설교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발, 13건설연구T01)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Shin, H., and D. Kim, 2012, Present Construction State of Long Undersea Tunnels and Facing Technical Issues. Review of Architecture and Building Science. 56(2): p. 81-83.
- Palmström, A., 1994, The challenge of subsea tunnelling. Tunnelling and Underground Space Technology, 9(2): p. 145-150.
- Park, W., S. Han, M. Oh, T. Han and J. Ko, 2012, Technical Trend on Submerged Floating Tunnel. Journal of the Korean Society of Civil Engineers. 60(8): p. 23-29.
- Hashimoto, K. and Y. Tanabe, 1986, Construction of the Seikan undersea tunnel—II. execution of the most difficult sections. Tunnelling and Underground Space Technology, 1(3): p. 373-379.
- Ikuma, M., 2005, Maintenance of the undersea section of the Seikan Tunnel. Tunnelling and Underground Space Technology. 20(2): p. 143-149.
- Backer, L. and O.T. Blindheim, 1999, The Oslofjord subsea road tunnel. Crossing of a weakness zone under high water pressure by freezing, Challenges for the 21st Century: Proceedings of the World Tunnel Congress '99, pp. 309-316.
- Nilsen, B., 2011, Cases of instability caused by weakness zones in Norwegian tunnels. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 70(1): p. 7-13.
- Dahlø, T. and B. Nilsen, 1994, Stability and rock cover of hard rock subsea tunnels. Tunnelling and Underground Space Technology, 9(2): p. 151-158.
- Biggart, A. and R. Sternath, 1996, Storebaelt eastern railway tunnel : Construction. in Proceedings of the ICE-Civil Engineering.: Thomas Telford.
- Bejui, H. and T. Avril, 1986, French experience in the field of submarine tunnelling. Tunnelling and Underground Space Technology. 1(3): p. 251-260.
- Kim, H., S. Jeon, and E.-S. Park, 2012. Evaluation of monitoring items for adverse ground conditions in subsea tunneling. Tunnelling and Underground Space Technology. 32: p. 19-33.
- Park, E., H. Shin, Y. Shin, and T. Kim, 2009. Management of Risk Scenarios based on Ground Conditions under Construction of a Subsea Tunnel. TUNNEL AND UNDERGROUND SPACE, 19(4): p. 275-286.
- Hong, S., Y. Kim, H. Kim, G. Bae, 2010, A Fundamental Study of Artificial Ground Freezing. : Proceedings of Korean Geo-Environmental Society Fall conference, p. 417-421.



최승범

2009년 서울대학교 공과대학 지구환경
시스템공학부 공학사

Tel: 02-880-9304

E-mail: chbum092@snu.ac.kr

현재 서울대학교 공과대학 에너지시스
템공학부 박사과정



김현우

1997년 서울대학교 공과대학 자원공학
과 공학사

1999년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사

2012년 서울대학교 대학원 지구환경시
스템공학부 공학박사

Tel: 042-868-3243

E-mail: hyunwoo.kim@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지구환경연
구본부 박사후연수



이수득

2010년 서울대학교 공과대학 에너지자
원공학과 공학사

2012년 서울대학교 공과대학 에너지시
스템공학부 석사

Tel: 02-873-8766

E-mail: ics1961@snu.ac.kr

현재 서울대학교 공과대학 에너지시스
템공학부 박사과정



전석원

1987년 서울대학교 공과대학 자원공학
과 공학사

1989년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사

1991년 (미)캘리포니아 주립대학 대학
원 공학석사

1996년 (미)아리조나 주립대학 공학박사

Tel: 02-880-8807

E-mail: sjeon@snu.ac.kr

현재 서울대학교 공과대학 에너지시스
템공학부 교수