

해저터널건설을 위한 주요 기술적 과제

신희순 (한국지질자원연구원)

1. 서 론

인구밀도 세계 3위인 우리나라는 삼면이 바다로 둘러 싸여 있고 전체 국토의 2/3 이상이 산악 지형으로 형성되어 있어 주거 및 교통공간의 확보에 많은 어려움을 겪고 있다. 최근 국내외에서는 연안지역 또는 국가간 교통 물류 네트워크를 형성시키고, 태풍과 폭설 등 천재지변에 자유로운 해저터널 건설에 대한 새로운 요구가 제기되고 있다.

국내에서는 거가 해저터널(3.7km)이 2010년 12월 14일에 개통되었고 대천항~원산도간 보령 해저터널(6.29km)은 금년 10월에 공사에 들어갈 예정이다. 한편 경상남도에서는 창원시 마산 구산면 심리~거제시 장목면 황포리간 해저터널(6.29km)건설 방안을 추진중에 있다. 인천시가 국토해양부에 신청한 인천국제공항과 서산시를 잇는 서해안 해저터널 건설에 대하여 현재 검토되고 있다. 최근 러시아 정부는 2030년까지 1000억USD(약 107조원)를 투입하여 베링해협에 해저터널(104km)을 건설하는 계획을 승인했다. 해저터널이 완성되면 영국 런던에서 미국 뉴욕까지 기차로 15일정도 걸리게 된다. 해저터널이 건설되면 전세계 물동량의 5% 가량이 철도를 이용하게 되어 연간 70억USD의 수익을 올리게 될 것으로 전망하고 있다.

앞으로 전개될 21세기의 국토 확장과 전 세계를 하나의 교통로로 연결하는 범국가적 프로젝트 실현에 대비하여 해저터널건설을 위한 기반기술 개발 및 축적이 시급한 상황이다. 해저터널 건설 방법으로는 개착식, 지중 굴착식, 침매식, 부유식 등 각기 건설조건과 용도에 따라 다양한 방법들이 사용된다. 본 논문에서는 지중굴착식 교통용 해저터널에 대하여 기술하고자 한다.

2. 해저터널의 건설현황

현재 전세계적으로 교통용 해저터널중에서 지중굴착식 해저터널은 44개 정도로 조사되었다(표 2.1).

표 2.1 지중굴착식 교통용 해저터널

국 가	해저터널수	국 가	해저터널수
노르웨이	28	일 본	3
Faroe Islands(덴마크령)	3	중 국	2
러시아	2	영국+프랑스	1
네델란드	1	덴마크	1
아이슬란드	1	스웨덴	1
이집트	1		

현재 지중굴착식 해저터널이 있는 10여개 나라중에서 노르웨이에는 28개가 있어 해저터널의 건설분야에 있어 기술을 선도하고 있다. 해저터널의 길이도 점차 길어져 가고 있으며 5km 이상의 해저터널은 19개가 건설되었다(표 2.2). 현재 구상중인 대규모 해저터널로는 대만해협터널(125~170km), 베링터널(104km), 지브롤터터널(42.7km), 일본·러시아 해저터널(42km), 한·중해저터널(198~374km), 한·일해저터널(220km)등이 있다

표 2.2 길이 5km 이상의 해저터널

순위	터널명	국 가	터널길이(m)	완공년도	용 도
1	Seikan	일 본	53,850	1988	철도
2	Channel	영국-프랑스	50,450	1994	철도
3	Shin Kanmon	일 본	18,713	1975	철도
4	Tokyo Aqua	일 본	9,583	1997	도로
5	Xiang-an	중 국	9,000	2010	도로
6	Storebaelt	덴마크	8,024	1997	철도
7	Bømlafjord	노르웨이	7,931	2000	도로
8	Eiksundet	노르웨이	7,797	2007	도로
9	Oslofjord	노르웨이	7,390	2000	도로
10	Nordkapp	노르웨이	6,875	1999	도로
11	Jiaozhou Bay	중 국	6,170	2010	도로
12	Nordoyatunnilin	Faroe Island	6,100	2006	도로
13	Atlantehav	노르웨이	5,955	2009	도로
14	Byfjord	노르웨이	5,875	1992	도로
15	Hvalfjarðargöng	아이슬란드	5,770	1998	도로
16	Hitra	노르웨이	5,645	1994	도로
17	Finnfast	노르웨이	5,600	2009	도로
18	Frøya	노르웨이	5,305	2000	도로
19	Freifjord	노르웨이	5,086	1992	도로

3. 해저터널의 특성

대부분의 해저터널공사에서는 단층과 연약대, 대규모 해수유입으로 인한 안정성 문제가 주요한 항목이고 도전이 된다. 해저터널은 일반터널과는 다음과 같이 여러 가지 면에서 차이가 있다.

- 주요공사구간이 바닷물로 덮혀있다. 자주 상당한 토사층이 해저바닥에 퇴적되어 있을 수 있다. 조사기술들이 적용되어야 하며 조사결과의 해석에는 육상터널에서 보다 더 많은 불확실성이 있다. 높은 양질의 지반조사와 설계가 요구된다.
- 해수의 유입가능성이 무제한이며 수압이 매우 높다. 높은 수압하에서 터널시공시 유입수 대책이 중요하다.
- 해수유입의 예측은 일반적으로 매우 어렵다.
- 해저터널의 연속적인 붕괴 또는 상당한 양의 해수유입은 대형 참사로 이어질 수 있다. 따라

서 이러한 위험에 대한 대책마련이 필수적이다.

- 해수유입의 가능성이 불확실하며, 모든 유입수는 펌프를 이용하여 터널밖으로 양수해야 한다.
- 유입된 해수는 염분을 함유하고 있어 터널굴착장비와 지보재에 상당한 부식문제를 발생시킨다.
- 터널입구 및 출구에서부터의 하향기울기는 교통 및 양수에 높은 비용을 발생시킨다.
- 터널상부 최소암반두께의 최적화가 항상 해저터널설계의 핵심요소가 된다.
- 연약대의 가우지가 팽창성이 큰 점토(montmorillonite)를 많이 함유하는 경우가 잦다. 명확한 단층과 취약대의 처리가 매우 중요하다.
- 터널굴착중 지속적인 지질조사가 필요하다.
- 터널굴착중 예기치 않은 사태발생에 대한 높은 수준의 경계와 조치가 준비되어있어야 한다.
- 지반조사, 설계, 굴착 및 시공 동안 높은 수준의 품질관리가 확실히 보장되어야 한다.
- 고수압과 해수의 특수한 환경조건으로 인해 지반조사가 어렵기 때문에 이러한 상태에서 건설된 해저터널은 육상터널보다 훨씬 높은 안정률이 확보되어야 한다.
- 터널내 위험물질의 운송에 관한 특별한 제약이 필요하다.

4. 해저터널의 기술적문제

4.1 지반조사

계획단계에서 지질조건은 주요 핵심사항이다. 파악되지 못한 지질조건으로 인한 예기치 못한 사태는 공기지연, 공사비 추가 등 많은 어려움을 가져다 준다. 자세한 지반조사의 부족은 굴착과정과 유지관리시 예기치 못한 문제들을 일으킨다. 최적 노선선정을 위해서는 적절하면서 충분한 체계적 지반조사가 요구된다. 선정된 노선에 대하여, 특히 기반암내 저속도대(연약대)에 대하여 보다 정밀한 굴절법 탄성파탐사를 실시한다. 코아시추는 해안에서 노선중 가장 심부인 곳까지 실시하며 일반적으로 방향코아 시추가 실시된다. 해상에서 코아시추를 하는 경우는 흔하지 않다. 노르웨이에서는 지반조사비용이 일반적으로 굴착비용의 3~7%에 달하고 있다. 아무리 광범위한 지반조사를 실시하여도 모든 암반의 특성을 파악할 수는 없다. 해저터널의 경우 예상치 못한 조건에 마주칠 수 있다. 따라서 터널막장에서의 선진 천공작업에 의한 전방 지반상태 파악은 매우 중요하다.

4.2 터널상부 암반두께

최적의 최소 암반두께는 경제적인 면에서나 안전 측면에서 매우 중요하다(그림 4.1).

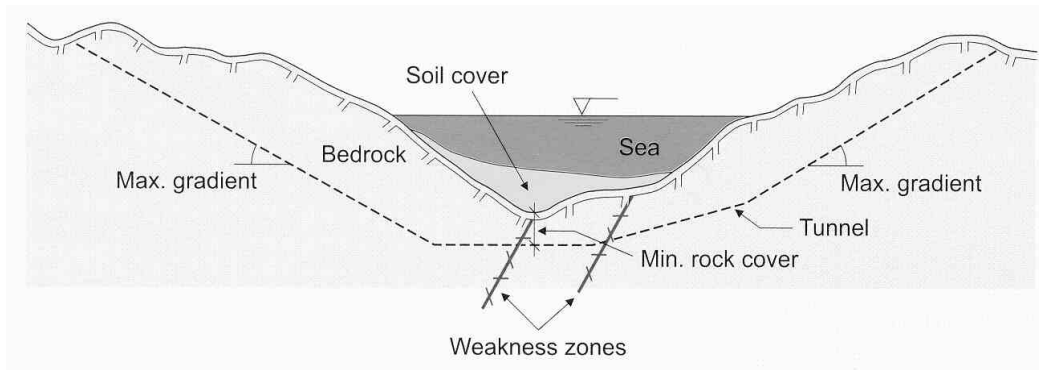


그림 4.1 해저터널의 노선

과도한 암반두께는 터널을 필요이상으로 길게 하여 추가적 건설비용과 운영비, 교통비용을 증가시킨다. 최대 터널 종단경사를 5%로 할 때, 암반두께가 1m 증가하면 터널길이는 20m 길어진다. 지나치게 얇은 상부 암반두께는 굴착작업을 불안정하게 하며, 해수유입 등 문제를 발생시켜 과도한 그라우팅 및 높은 양수비용을 들게 하거나 최악의 경우에는 전체 터널의 폐쇄를 가져온다. 그러므로 최소 암반두께의 최적화는 해저터널계획의 가장 중요한 요소이다. 노르웨이에서는 최소 50m가 요구되며 50m 미만은 관계기관(Norwegian Public Road Authorities)의 승인을 받아야 한다. 암반두께는 15m~58m로 다양하다. 채널터널은 최소토피고(토사층+암반층)는 40m, 세이칸 터널은 100m 였다.

노르웨이에서는 단선터널 종단경사는 6~7%, 복선터널은 8%로 하고 있으며, 교통량이 적은 경우는 10%도 허용하고 있다. 채널터널은 최대 종단경사가 11%, 세이칸 터널은 12%, 동경만해저터널은 4%, 중국 Xiangnan 터널은 3% 였다. 보령해저터널은 토피 24~60m, 종단경사 5%였으며 한강 하저터널(1,288m)의 경우 풍화대토피복 13.5~19.5m, 종단경사는 2.3~3.0 % 였다. 한편 거가 침매터널의 종단경사는 4.75~5.0 %였다.

4.3 해수 유입 예측

터널내 해수 유입예측은 매우 어려운 작업이다. 예측가능성을 높이기 위해서는 다음 사항이 제안된다.

- 가장 중요한 조사는 상세한 지질도작성(mapping) 이다. 지질구조의 파악은 매우 중요하며 절리와 단층/연약대의 방향등의 파악은 특히 중요하다.
- 암반내 응력의 크기와 방향은 해수유입에 영향을 준다. 가능하면 최대주응력의 방향을 파악을 위한 초기응력측정이 수행되어야 한다.
- 암반토피가 매우 큰 터널 상부에 자유수면이 있고 화성암, 주요 암종경계가 있는 조건은 높은 해수유입의 위험성을 증가시키는 요소로 간주하여야 한다.
- 해저터널 공사시 매우 불량한 암질의 암반을 자주 마주치게 된다. 가장 불리한 조건은 심하게 파쇄된 암석과 팽창성 점토를 지닌 큰 단층 또는 연약대 들이다. 이러한 구간에서의 해수유입은 터널자립시간을 극적으로 감소시키며 붕괴를 발생시킨다. 단층대 인접 암반에서는 연속성 있는 뚜렷한 열린 절리들이 발견되는 데 이것이 전체적인 해수유입에 중요한 역할을 한다.

- 터널내에서 유입량을 정확히 예측하는 것은 일반적으로 매우 어렵지만 사용가능한 모든 지질정보와 현장 지반조사결과에 기초로 하여 예측이 이루어져야 한다. 표 4.1은 하해저터널의 유입량 설계기준 사례를 보여준다.

표 4.1 하해저터널 유입량 설계기준

터널	세이칸 터널	채널터널	노르웨이 해저터널	Xiangan 터널	보령해저 터널	한강하저 터널
수 심(m)	최대 140	55	19~287	최대 70	최대 37	4~20
토피고(m)	최소 100	평균 40	15~58	15 이상	24~60	23
형 식	배 수	비배수	배 수	비배수	배 수	비배수
유입량설계기준 (m ³ /min/km)	◦본선터널: 2.0 ◦서비스터널: 1.0	0.4	0.3	0.1~0.7	0.5	2.0

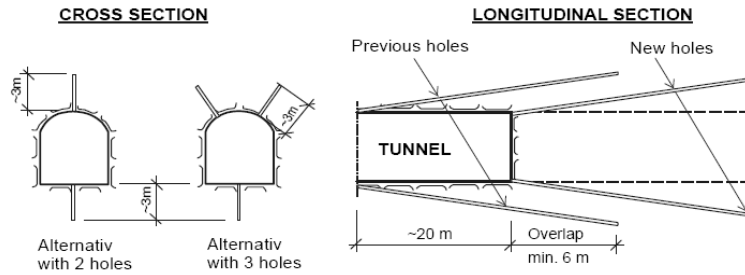
4.4 굴 착

4.4.1 선진천공 과 탐지공

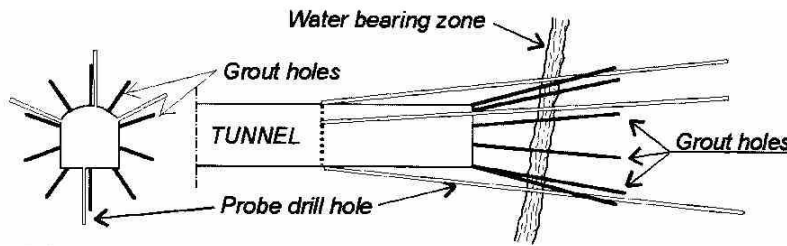
터널막장 전방의 사전 천공은 해저터널에서 가장 신뢰성 있는 방법이며 표준화된 방법이다. 일본 세이칸 터널의 경우에는 수평 선진 시추기술을 시공중 많은 시행착오 끝에 개선 및 개발되어 매우 불량한 지질상태에서도 1,000m는 가능하게 되었고, 최대 2,150m를 기록하기도 하였다. 노르웨이 Frøya 터널(길이 5.3km)의 경우에는 매 20m 굴착시마다 3~6개의 조사용 시추공을 막장전방에 천공하여 지반조건에 대한 정보를 얻었다. 해수면아래에서는 30m 길이의 적어도 6개 탐지공(probe holes)을 천공하였다. 이런 방법으로 어려운 지반에서 터널굴착 전에 필요한 조치를 취할 수 있었다.

4.4.2 해수유입량 및 지반보강

탐지공 천공후, 한 탐지공에서 5 L/min 또는 탐지공 1개이상에서 누수가 3~5 L/min 사이이면 사전그라우팅을 실시한다(그림 4.2).



(a) 탐지공



(b) 사전 그라우팅

그림 4.2 탐지공과 사전그라우팅의 개략도- 불량지반이 예상되거나 추가지반정보 필요시에는 코아시추를 실시한다.

사전 그라우팅을 위한 일반적인 과정은 탐지공을 포함하여 총 21개 공을 천공한다. 그라우팅 공의 길이는 18~24m 이다. 그라우팅후 4~6개의 조절공(control holes)을 천공한다. 조절공은 누수가 감소되는 지 여부를 보여준다. 만일 누수가 심하면 더 많은 그라우팅을 실시해야한다. 급결 시멘트로는 좋은 결과를 얻기 어려울 때는 마이크로시멘트가 자주 사용된다. 이런 사례는 점토함유 구간에서 전형적으로 흔히 발생한다. 주입중 사용되는 최대 압력은 50~60 bar 이다. Frøya 터널 양쪽에서 급결시멘트 와 마이크로시멘트로 사전그라우팅을 실시하였다. 터널내로의 총 누수는 310 L/min 즉 8.5 L/min/100m 였는데, 이것은 허용 누수량 30 L/min/100m 이하였다.

해저터널공사에서 고압의 유입수가 문제이며, 무한정한 유입수를 처리해야만 한다. 노르웨이 해저터널중 수심이 깊은 3개 터널인 Hitra tunnel(264m), Bømlafjord(260m) 와 Eiksundet(287m)에서는 2~3 MPa에 달하는 수압에 대하여 그라우팅작업이 현대적인 패커(packers)와 펌프, 그라우팅 재료를 사용하여 효과적으로 수행되었다. 현재 10 MPa 까지의 그라우팅 압력 달성이 가능하다. 경험상으로 유입량은 그대로 두면 자체적인 폐쇄작용으로 50%까지 감소된다. 집수정은 최저점에 위치하며 허용유입량(300 L/min/km)을 적어도 24시간 저장할수 있는 용량이다. 터널굴착 시 유입량은 지역과 지반조건에 따라 20~460 L/min/km 로 다양하다. 경제적인 양수를 위한 목표수준은 300 L/min/km 으로 사전그라우팅으로 달성된다. 일본 세이칸 터널에서는 주입범위의 크기를 보통 지질구간에서는 터널반경의 3배정도, 단층파쇄대에서는 5~6배 정도로 하여 시공하였다. 중국 Xiangnan 해저터널(6.05km)는 발파로 굴착하였으며 직경 16.5m, 서비스터널의 직경은 7.5m 이다. 천반에서 받는 압력을 0.65MPa로 하고, 숏크리트 강도는 25MPa이상, 콘크리트라이닝은 45MPa이상을 적용하였다. 터널내 유입량을 35~42m³/min 로 하고, 그라우팅시 3.5~7.0m³/min 로 감소할 것으로 예상하였다. 보령해저터널의 경우 탐지공 1개공에서 4 L/min 이상이거나 3개공에서 총 8

L/min 이상 유입시 차수그라우팅을 실시하는 것으로 설계되었다. 분당선 한강하저터널의 경우 유입량 200 L/min/km 이상일 경우 그라우팅을 실시하였다.

4.4.3 이상 해수유입 사례

일본 세이칸 터널공사 중 최대 출수사고가 1976년 5월 6일 Yoshioka에서 발생하였는 데, 3,015m 구간이나 수몰되었고, 복구작업후 출수발생 막장에 도달하는 데 5개월 소요되었다(표 4.2).

표 4.2 이상출수 사고

공구	터널	출수막장위치 (수심, 토피고)	유입량 (t/min)		수몰구간(m)	복구착수 까지일수 (일)	복구공사 소요 월수	복구대책	지질
			최대	최종					
Tatpi	경사 터널	1k 223m (25m, 215m)	16	5.5	196	24	6.3	지수주입, 측벽도강 직진	안산암 파쇄대
	작업 터널	16k 890m (78,102m)	6	1.6	130	36	5.6	우회갱	응회암, 현무암관입에 의한 파쇄
Yoshi- oka	작업 터널	32k 746m 85 (58,134m)	11	9.0	880	27	11.6	주입고결 직진	응회암(사질) 파쇄대
	작업 터널	31k 669m95 (76,128m)	70	121.0	작업갱 3,015/본 갱 1,493	50	4.4	우회갱	응회암 파쇄대

4.4.4 지보재

노르웨이에서는 모든 지보구조는 현장타설 콘크리트라이닝 또는 철근보강 슛크리트로 되어있으며 배수형식이다. 슛크리트의 두께는 최소 60~70mm이고 강도가 C45이면 강섬유 부식은 문제가 안된다. 슛크리트의 사용은 0.7~1.0m³/m에서 약 1.5~2.0m³/m로 해가 갈수록 증가되고 있다. 지반안정을 위해서 6m 길이의 spiling bolts(전단면 그라우트 철근볼트)를 3m 마다 0.2~0.5m 간격으로 설치한다. 발파후 강섬유보강 슛크리트를 천정, 측벽, 막장면에 시공한다. 지반이 매우 불량하면 분할굴착과 콘크리트 라이닝을 추가 시공한다. 터널붕괴나 막장면이 밀려나오는 위험상황이 발생하면 신속히 터널 막장면에 충분히 슛크리트를 타설 한다.

록볼트는 해저터널의 환경에 적합하도록 부식방지가 되어있다. Eiksundet 해저터널에서 사용된 CT-bolt는 여러 단계의 부식방지가 되어 있다. 록볼트의 추가 보강량은 1.5~7.0 bolts/m 로 다양하다. 노르웨이 해저터널에서의 추가적인 암반보강사례는 표 4.3에서와 같다. 슛크리트는 대부분 계획보다 1~2m³/m 정도 더 보강하였다. 채널터널에서는 프랑스쪽은 수압이 6기압인 조건에서 최대 10기압까지 견딜수 있도록 EPB TBM으로 시공하였다. 고수압에 저항하기 위해 50MPa 이상의 고강도 콘크리트를 사용하고 지반과 콘크리트 라이닝사이의 공극을 급결 그라우팅으로 보강하였다.

표 4.3 추가적인 암반보강사례 (Bjørn Nilsen, 2009)

Tunnel	Completed	Rock types	Excavation rate (m/week)	Bolts (No./m)	Shotcrete (m ³ /m)	Concrete lining (rel.%)	Grouting (kg/m)
Vardø	1981	slate and sandstone	17	6.9	0.95	21.0	31.7
Karmsund	1884	gneiss, phyllite	34	1.5	0.72	15.0	13.4
Ellingsøy	1987	gneiss	28	6.5	0.48	3.0	99.1
Freifjord	1992	gneiss	45	5.4	1.44	2.1	13.7
Kvalsund	1988	gneiss	56	4.0	0.31	0.0	0.0
Hitra	1994	gneiss	46	4.2	1.44	0.2	11.4
North Cape	1999	shale, sandstone	18/56	3.4	4.00	34.0	10.0
Frøya	2000	gneiss	37	5.0	2.90	5.0	197.0
Bømlafjord	2000	greenstone, gneiss	55	3.8	1.90	0.0	36.0
Oslofjord	2000	gneiss, amphibolite	47	4.0	1.70	1.0	165.0

4.5 해수에 의한 부식

터널내 유입된 해수내의 염분은 매우 부식성이 크다. 펌프, 배수파이프, 전기설비 와 방수·결빙차 폐설비들이 주기적으로 교체되어야 한다. 제안된 설비의 수명은 15년에서 40년까지 다양하다. 강제는 부식저항성이 있어야 한다. 노르웨이내 해저터널들의 재투자, 유지 및 운용비는 65~130 USD/m/year 로 초기투자비용의 1.0~1.5%이다. 전력비는 년 유지 및 운영비의 25~50%이다. 전력비 중 환기비용이 가장 많이 차지한다.

4.6 화재 기타

채널터널의 경우에는 1996년 1월 18일 화재로 인명피해는 없었으나 7시간 화재가 발생하여 400m의 터널이 손상되었으며 7개월간 보수를 해야했다. 2006년 8월 21일 화재로 7시간 터널을 폐쇄해야 했고 2008년 9월 11일에는 16시간 화재로 14명의 사상자가 발생하였다. 노르웨이의 해저터널내 교통사고종류는 단일차량사고 46%, 충돌사고 25%, 추돌사고 23%이다. 사고 발생율은 터널내로 들어갈수록 감소하며 터널 입출구는 유사하다. 터널이 길수록 사고발생율은 작아지는 경향이 있다. 현재까지 화재사고는 3차례 있었으나, 화재로 인한 인명사고는 없었다. 터널내에서 안전하고 쾌적한 운전을 위해서는 조명을 좀더 높이고, 터널내부 표면에 색있는 빛을 설치할 것을 권고하고있다. 천정부 라이닝은 어두운색, 벽면은 회색으로 규정하고 있다.

5. 결론

해저터널건설을 위한 주요 기술적 과제와 관련하여 외국 해저터널의 설계 및 시공사례에 대한 분석을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 지질구조, 지반조건의 올바른 파악은 해저터널공사에서 가장 주요한 요소이다. 최적의 노선 선정을 위해서는 설계단계에서 체계적이고 적절한 지반조사가 이루어져야 한다.
- (2) 해저터널건설 전 과정에서 가장 큰 위험은 갑작스러운 해수유입이다. 갑작스러운 해수유입의 위험도분석은 매우 중요하다. 위험도는 지질조건예측의 신뢰도에 좌우된다. 설계단계에서 위험분석과 불확실성평가가 수행되어야 한다.
- (3) 지반조사는 시공중에도 계속되어야 하며, 터널막장의 지질도작성(mapping)은 경험있는 전문가에 의해 수행되어야 한다.
- (4) 해수의 유입수량의 억제와 처리가 매우 중요하다. 고수압의 위험구간에 대한 차수 및 보강 공법 확보가 필요하다.
- (5) 시공중의 안전과 대형 재해방지를 위해서는 작업막장 전방에 대한 체계적이고 지속적인 선진 천공, 해수 조절, 사전 그라우팅, 사전 비상대책, 철저한 품질관리 등이 마련되어야 한다.
- (6) 해저터널의 구조물 및 이용자 보호를 위하여 안전성, 경제성 측면에서 최적화된 환기 및 방재설비, 터널의 변형, 수위, 누수 등 실시간 모니터링 시스템에 대한 검토가 요구된다.

참 고 문 헌

1. 신희순, 2009, 해저터널 개발, 한국지구시스템공학회지, 제46권 제1호, 125-133.
2. 박의섭, 신희순, 2008, 해저터널 기술현황-국내외 현황 및 특성, 한국터널공학회지, 제9권, 제4호, 80-90.
3. 이규필, 신중호, 2008, 하-해저터널 배수 및 비배수 설계개념 및 사례, 한국터널공학회지, Vol.10, No.1, 57-64.
4. Bjørn Nilsen, 2009, Engineering geological aspects of subsea tunnels, Subsea Tunnels, Norwegian Tunnelling Society, Publication No.18, 14-17.
5. Heur, R.E, 1995, Estimating rock tunnel water inflow, Proceedings of Rapid Excavation and Tunnelling Conference, 41-66.
6. Holmøy, K. H., 2009, Significance of geological parameters for predicting water leakage in hard rock tunnels; Proceedings of Strait Crossing 2009, 231-236.
7. Foose, G.J., Benson, C.H. and Boscher P.J., 1996. Sand reinforced with shredded waste tire. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 122, 760-767.
8. Norwegian Public roads Administration, 2006, Subsea road tunnels in Norway, Publication No.98, Directorate of Public Roads, 30p.