

해저터널 건설 및 굴착공법



소충섭

(주)삼보기술단
지반사업부 부사장

1. 해저터널 건설공법 검토시 착안사항

해저터널은 육상에 건설되는 터널에 비해 아래와 같은 몇 가지 특성을 갖고 있으며 이에 대한 충분한 사전 검토를 거쳐 건설공법을 결정하게 된다.

- 고수압 조건
- 불확실한 지반 조건
- 초장대 터널로서의 시공성 및 공기
- 해양 환경 영향

1.1 고수압 조건

해저터널이 육상 터널과 다른 가장 큰 특성은 말 그대로 터널이 바다 밑에 건설되기 때문에 높은 수압을 받는 조건에 놓인다는 것이다.

이미 건설되어 운영중인 영·불 해협터널(The Channel Tunnel)이 위치한 도버 해협의 평균 수심은 약 50m, 세이

간 터널이 건설된 츠가루 해협의 최대수심은 140m이며 건설의 타당성을 검토 중인 한·일 해저터널은 최대 220m, 한·중 터널은 약 70m깊이의 바다 밑을 지나게 된다.

물론 터널계획시 수심, 지질조건 등을 충분히 고려하여 안전한 심도를 확보하겠지만 평면 및 종단선형의 제약에 따라 연약층을 통과해야 하거나 지반조사의 불확실성 때문에 예기치 못한 파쇄대 등을 시공 중 만날 개연성이 매우 크며 이 경우 고수압의 출수상태에 직면하게 된다.

발파공법의 경우 굴착면에서의 출수는 안전과 직결되므로 차수와 보강공법으로 해결이 가능한지, 공사비와 공기에 미치는 영향은 어느 정도인지 심도있게 검토되어야 한다.

셸드공법은 면판에 의해 굴진면이 밀폐되고 굴착 주변에 세그먼트라이닝이 즉시 시공되기 때문에 어느 정도 출수가 있더라도 비교적 안전하게 시공이 가능하다.

그러나 셸드장비의 경우 수압이 약 100m 수두에 해당하는 10 bar 이상이 되면 장비가격 상승이 큰 부담요소가 된다고 알려져 있다.

1.2 불확실한 지반조건

육상터널도 마찬가지로이지만 특히 해저터널을 계획함에 있어서 지반조사는 많은 제약이 있을 수밖에 없어 해저 지반에 대한 지질학적·지반공학적 정보확보가 매우 어렵다.

그러나 시공중 단층대나 파쇄대 등의 연약층을 만나면 높은 수압의 해수가 무한정 유입될 수 있기 때문에 이에 대한 사전조사 및 대비가 필수적이므로 해저 지형 및 지반에 대한 조사 및 탐사를 위한 장비·기술 개발과 실용화 연구가 국내·외에서 활발히 진행 중이다.

셰이칸터널은 발파작업 중 해수유입으로 터널 전체가 침수되는 피해를 보았고 공사 기간도 25년이나 걸렸으며 영·불터널은 30여년에 걸친 시추조사결과를 바탕으로 양호한 지층을 따라 종단선형을 계획하였다.

1.3 초장대 터널로서의 시공성 및 공기

바다를 횡단하는 해저터널은 5~10km의 비교적 짧은 터널부터 53.85km(해저구간 23.3km)의 셰이칸터널, 50.45km(해저구간 38.0km)의 영·불 터널이 건설되어 운영 중에 있으며 검토 중인 한·일 터널은 약 220km, 한·중 터널은 노선에 따라 340~380km의 초장대 터널로 계획하고 있다.

초장대 해저터널은 운영 중의 환기·방재 목적상 일정 간격의 외부 연결 시설물이 필요하며 이와 연계한 시공계획 및 인공섬 설치가 필연적이다.

인공섬 간격은 공기·공법·환기·방재 등이 종합적으로 검토되어야 하지만 철도터널기준으로 대략 40~50km 마다 설치가 필요한데 인공섬 축조비용이 개소당 수천억에 달하며 사업비의 큰 비중을 차지함을 간과해서는 안 된다.

1.4 해양환경 영향

해저에 건설되는 터널이라도 위에서 언급하였듯이 인공섬 축조가 불가피하거나 해양과 육지의 접속부에는 교

량구조물이나 침매터널 방식이 검토되기도 한다.

인공섬이나 침매터널 등의 인공축조물로 인한 해양환경의 영향은 먼 바다에서는 크지 않을 것으로 예상되나 연근해에서는 조류의 변화, 퇴적 또는 세굴의 영향 등으로 인한 해양환경의 변화에 대한 검토가 필요하다.

시공 중에도 인공섬 축조재료의 유실, 부유물 발생으로 인한 해양 오염문제나 실드공법 적용시의 굴착머력이 폐기물로 분류된다는 점에서 처리방안도 고려해야 할 항목의 하나이다.

2. 건설공법

해저터널의 건설공법은 앞에서 언급한 수심과 터널깊이에 따른 수압조건, 지반조사의 한계로 인한 불확실성, 선박운항 및 수로폭, 유속 등의 수리조건, 시공성, 공사기간, 환경영향 등을 고려하여 경제적이고 안전한 공법을 선정하게 되는데 일반적으로 실드 TBM공법, NATM으로 대표되는 Drill & Blasting공법, 침매공법 등이 있으며 각 공법별 특징은 표 1과 같다.

표 1. 해저터널 건설공법 비교

구분	실드 TBM공법	NATM	침매공법
단면형상	원형	마제형	제한없음
장점	<ul style="list-style-type: none"> •연약지반·파쇄대 통과시 안정성 우수 •고수압·저토평 구간 적용가능 	<ul style="list-style-type: none"> •적용가능한 지반 조건 범위가 넓음 	<ul style="list-style-type: none"> •굴착공정이 없어 안정성 우수 •대단면 가능
단점	<ul style="list-style-type: none"> •시공중 지층 변화에 대한 대응곤란 •단면 효율성 불리 	<ul style="list-style-type: none"> •파쇄대·단층대 통과시 안정성 저하 •고수압 조건에서 불리 	<ul style="list-style-type: none"> •유속이 빠르거나 수심이 깊은 곳에서 시공성 저하 •암반노출시 시공 곤란
시공사례	<ul style="list-style-type: none"> •영·불터널 •동경만 아쿠아라인 	<ul style="list-style-type: none"> •셰이칸터널 	<ul style="list-style-type: none"> •외레순터널 •거가터널

2.1 실드 TBM공법

실드 TBM공법은 터널외경보다 약간 큰 강재원통의 전면에 장착된 커터헤드로 지반을 굴착하면서 동시에 구조물이 되는 복공부재(세그먼트)를 후방에서 조립하여 설치하고 이 복공부재를 반력으로 활용하여 추진력으로 실드를 전진시켜 굴착을 진행하는 공법이다.

자립성이 낮은 지반과 저토피 조건에서 안정성이 우수하며 고수압의 해저터널에 유리하다. 당초 연약지반에 사용되는 공법이었지만 현재는 경암지반에서도 사용되며 대상지반 조건에 따라 다양한 장비가 있고, 최근에는 지

층조건이 다양한 복합지반에도 적용할 수 있고 단면형태도 원형 뿐만 아니라 다양한 형태가 가능한 장비가 개발되고 있다.

곡선 반경에 제한이 있고 장비가 고가이므로 초기 투자비가 크다.

2.2 NATM

대부분 발파에 의해 지반을 굴착하며 원지반 자체의 지보능력을 최대한 활용하고 락볼트(Rock Bolt), 슛크리트(Shotcrete) 등으로 보강하여 지반을 안정시키는 공법의

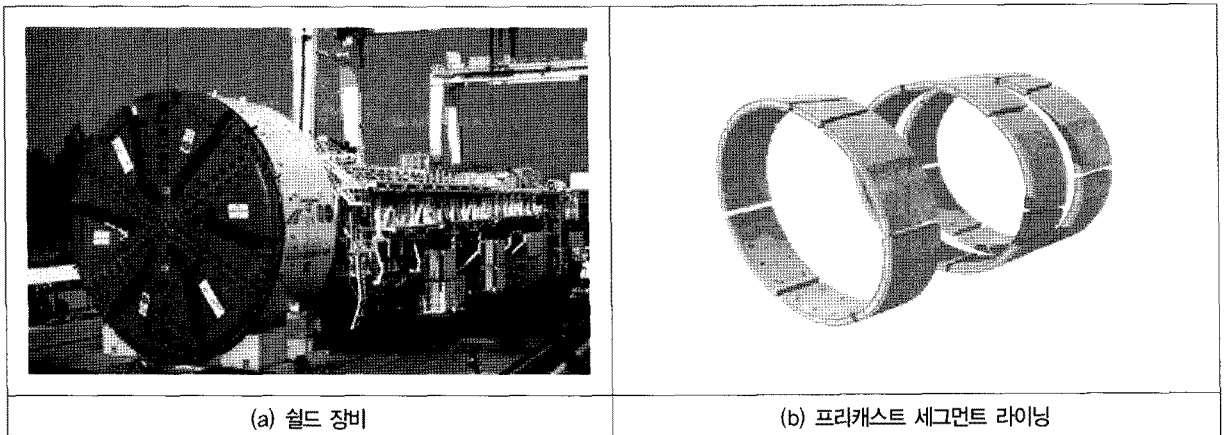


그림 1. 실드 TBM 공법

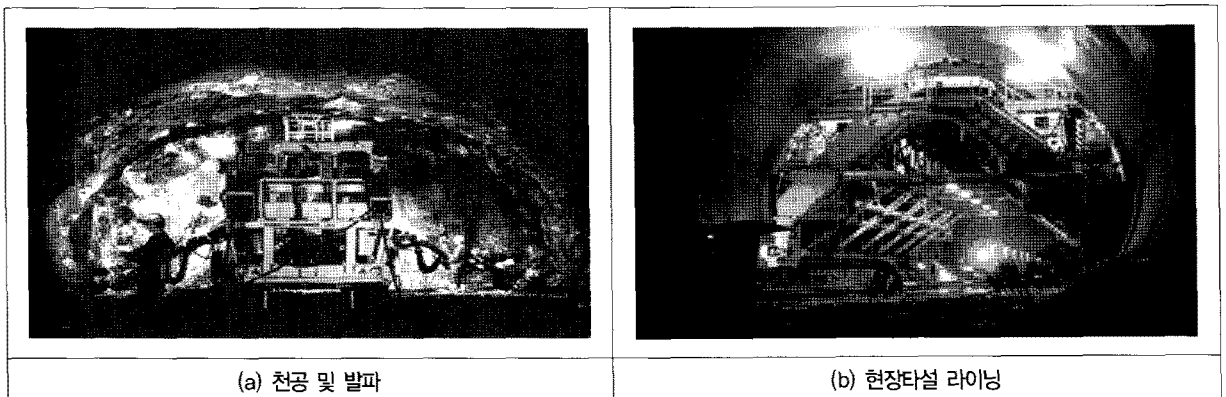


그림 2. NATM 공법

로 터널시공에 가장 많이 적용되는 공법이다.

이 공법은 지질변화에 대응하기 쉬운 토사에서부터 경암반까지 시공이 가능하며 지반이 복잡하게 변화하는 조건에서도 즉시 변경이 용이하다.

계측에 따른 안정성 확보와 경제적인 시공이 가능하고 터널의 선형에 제약이 없는 장점이 있으나 해저터널에서는 출수가 있을 경우 무한정의 침투수가 발생하기 때문에 이 문제에 대한 대처가 가장 중요하다고 할 수 있다.

2.3 침매공법

침매공법은 육상 또는 수상의 제작장에서 미리 제작한 함체를 물에 띄어 해당 위치까지 이동하여 수중에 조성된 트렌치에 침설시켜 수중에서 함체를 연결하고 퇴메우기 하여 터널을 완성시키는 공법이다.

안정된 조건의 제작장에서 원형, 구형 등 형상과 크기에 제한없이 터널함체의 제작이 가능하며 구조체의 품질 관리가 우수하고 공사기간이 단축되는 장점이 있으나 시공시의 해상조건이나 유속의 영향을 받으며 고수심에서 시공성이 불리하고 함체연결에 정밀시공이 필요하다.

3. 주요 해저터널 건설공법 사례

현재 건설된 교통용 해저터널은 약 40개소로서 주로 한 국가 내의 섬을 연결하거나 굴곡이 큰 해안선을 횡단하기 위해 건설되었지만 21세기에 들어서서 세계 경제의 개발화, 통합화 등의 시대적 조류와 함께 한·일, 한·중 터널, 중국~타이완터널, 지브롤터 해협터널, 베링 해협터널 등, 국가간 또는 대륙간을 연결하는 초장대 터널들이 구상 중이다.

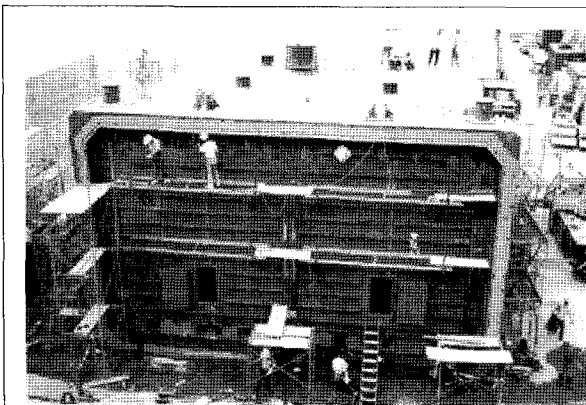
그간 건설된 주요 해저터널들을 건설 공법 위주로 살펴본다.

3.1 영·불 터널

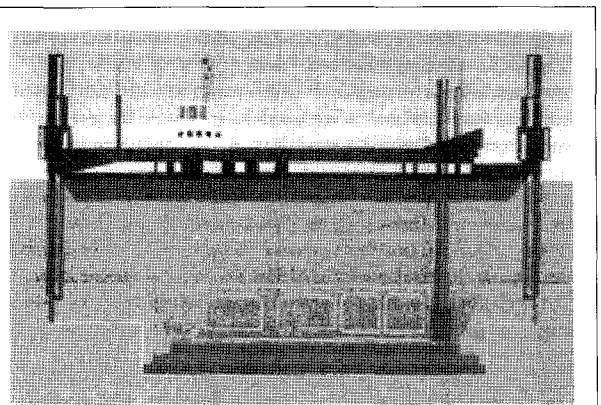
영·불 터널은 영국과 프랑스간의 도버 해협을 횡단하는 철도터널로서 총연장 50.45km이며 이중 해저구간은 38km이다.

건설공법은 토압식 쉴드 TBM을 적용하였고 본선터널은 직경 7.6m, 서비스터널은 직경 4.8m이다.

30년간 100공이상의 시추조사를 통해 백악기 이회암(Chalk marl)층을 통과하는 중단선형을 찾아 냈으며 쉴드장비 12대를 투입하여 굴진률 300~600m/month로 본



(a) 침매터널



(b) 침매터널 시공개요

그림 3. 침매터널



그림 4. 세계 주요 해저터널

표 2. 세계 주요 해저터널 특성

터널명	위치	터널연장(km)	용도	건설공법	완공년도
Seikan	일본	53.85	철도	NATM	1988
Channel	영국-프랑스	50.45	철도	셸드 TBM(토압식)	1994
Aqua	일본	9.5	철도	셸드 TBM(이수식)	1997
Bømlafjord	노르웨이	7.9	철도	NATM	2000
Öresund	덴마크-스웨덴	3.5	철도	침매	2000
Xiamen	중국	5.95	철도	NATM	시공중
Stobælt	덴마크	7.9	철도	셸드 TBM	시공중
유라시아	터키	3.34	철도	셸드 TBM	설계중
Bering	미국-러시아	103	철도	셸드 TBM	계획중

선터널을 3년 7개월만에 관통하였다.
 평균 수심은 50m, 최소 토피고는 40m이다.

3.2 세이칸터널

일본의 혼슈와 홋카이도를 연결하는 철도터널로서 츠가루 해협을 횡단하는 총길이 53.85km의 최장 해저터널로서 해저구간은 23.3km이다.

건설공법은 NATM이며 1964년 착공하여 약 25년의 공사 끝에 완공되었다.

선진도갱 및 막장전방 선진 시추를 통하여 지질상태를 파악하고 LW차수공법을 적용하였으나 1976년 발파작업 중 해수가 유입되어 터널 전체가 침수되는 사고가 발생하였다.

해협의 최대수심은 140m이고 안산암, 흑색셰일, 사질 암층을 통과하였다.

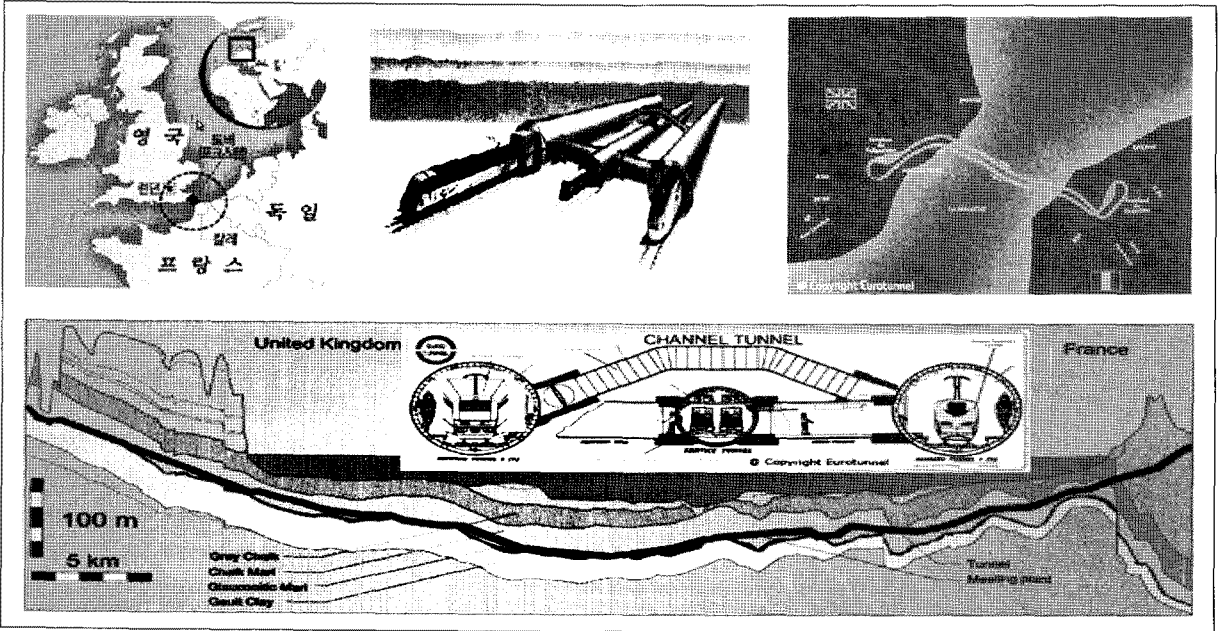


그림 5. 영불터널

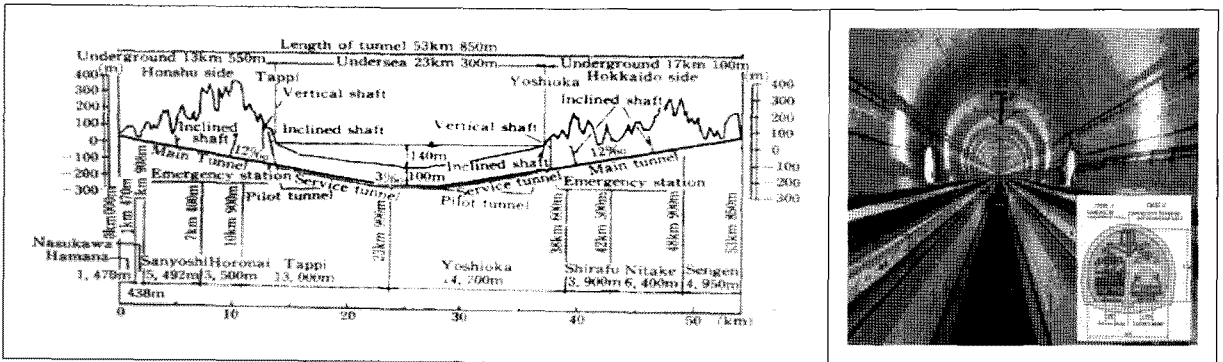


그림 6. 세이칸 터널

3.3 외레순트(Öresund)터널

덴마크의 코펜하겐과 스웨덴 말뫼를 연결하는 총 연장 16km의 외레순트 해협연결 도로 및 철도시설로서 이 중 덴마크쪽 약 3.5km 구간이 침매공법으로 건설되었으며 스웨덴쪽 약 8km는 교량이다.

침매함의 크기는 폭 38.8m, 높이 8.6m, 길이 176m로

서 4차로 도로와 왕복 2개 선로의 철도가 수용된다.

교량에서 해저터널로 연결되는 구간은 약 4km의 대규모 인공섬이 조성되었다.

3.4 동경만 해저터널(아쿠아라인)

동경만을 횡단하여 카나가와현 카와사키시에서 지바현

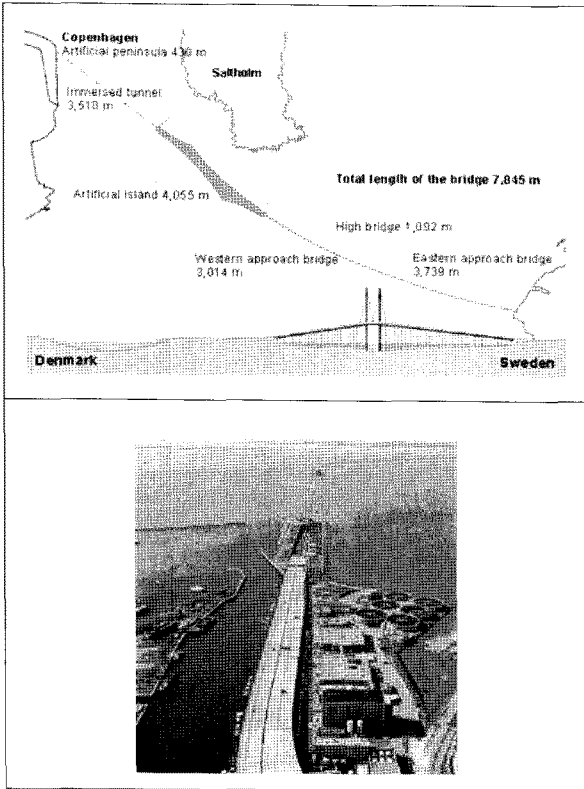


그림 7. 외레순트 터널

키사라즈시를 연결하는 총연장 15.1km의 도로로서 주항로인 카와사키 쪽 9.5km는 해저터널로 키사라즈쪽 4.4km는 교량으로 건설하였으며 터널과 교량 접속부와 터널 중앙부에 2개의 인공섬을 두었다.

건설공법은 직격 14.1m의 이수식 실드 TBM 8대를 동시에 사용하였으며 월평균 150m(최대 260m)를 굴진하여 터널공사에만 8년이 소요되었다.

일명 마요네즈 층이라 불리는 초연약층을 최소 토피고 16m, 평균수심 27.5m, 최대 6기압의 조건에서 안전하게 통과하였다.

3.5 유라시아 터널

터키 이스탄불의 보스포루스 해협을 횡단하여 유럽과 아시아를 연결하는 총 연장 14.6km의 자동차 전용 도로로서 BOT 방식으로 건설되며 현재 설계가 진행중이다.

해저구간은 약 3.34km로서 왕복 2차로의 복층 구조이며 건설공법은 이수식 실드 TBM으로 계획하고 있다. 대부분 연약층 및 파쇄대가 많은 트라키야층을 통과하고

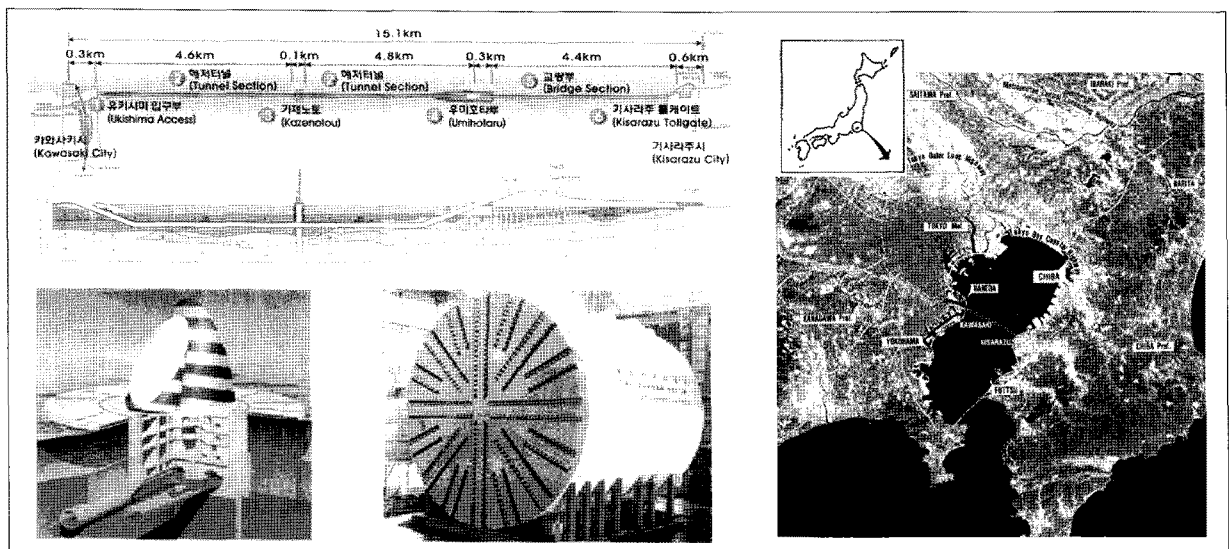


그림 8. 동경만 해저터널

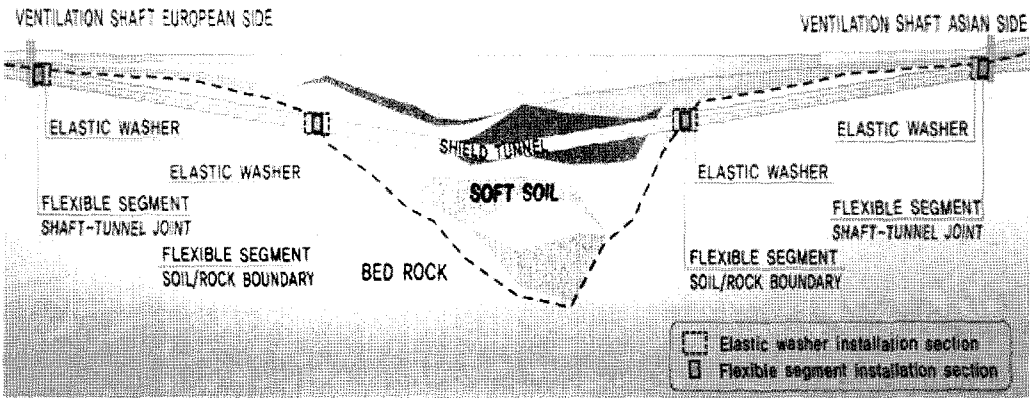
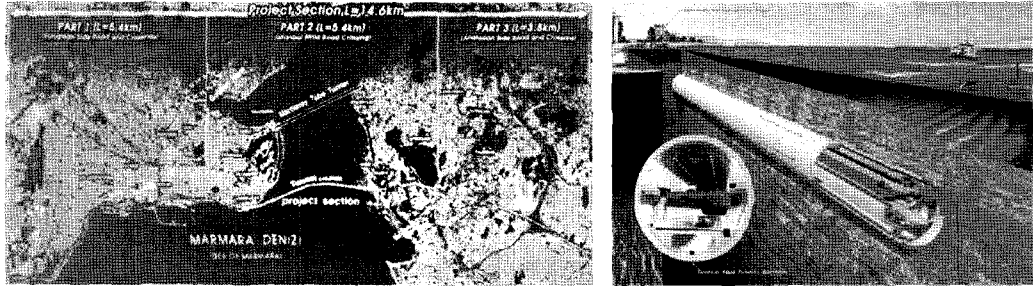


그림 9. 유라시아 터널

최대수심은 약 50m로서 고수압 복합지층에 대비한 안정성 확보가 필요하다.

우리나라 기술진(시공 : SK 건설, 설계 : 삼보기술단)이 주도적으로 참여하는 대형해저터널 프로젝트로서 차후 이 분야 기술발전에 기여할 것으로 기대한다.