

세계 해저터널과 한일터널

서경원_ 토목연구팀 선임연구원 skw@dwconst.co.kr

김웅구_ 토목연구팀 연구원 kwk@dwconst.co.kr

백기현_ 토목연구팀 책임연구원 bkh@dwconst.co.kr

1 서론

세계에서 가장 오래된 터널은 약 5000년 이전에 이란고원에 만들어진 「카나토」라 불리는 관개용수로써 20~30m 간격으로 종방향의 구멍을 뚫고 이것을 땅속에서 수평으로 연결하는 방식으로 20km 이상에 걸친 터널을 만들었다. 교통용으로 만들어진 터널 가운데 기록에 남아 있는 것은 기원전 2200년경 고대 바비론(현재 이라크 남부)의 세미라미즈 여왕의 통치 하에서 유프라테스 강 밑을 횡단하여 만들어진 폭 4.5m, 높이 3.6m, 길이 910m의 터널이다. 즉 4,200년 전에 공간적으로 떨어진 곳을 빨리, 안전하게 이동하기 위해 터널을 만든 것이다. 이후 B.C 700년 경에는 아시리아제국에서 만든 수로터널, 이스라엘의 예루살렘에서도 수로터널(540m)을 만들었고, 그리스의 사모스섬에서도 수로터널(1.5km)이 만들어졌다. 14세기 흑색폭약이 발명되어 프랑스의 랑캣트 운하 터널(1679년 완성)이 만들어졌고, 1818년에는 영국의 블루벨이 실드 공법을 발명하였으며, 1841년에는 템즈강 횡단터널이 완공되었다. 이후 터널 굴착기술은 눈부시게 발달하여 일본의 세이칸터널(53.8km)이 운영 중이며, 세계 최장터널인 스위스 Gotthard 터널(57.0km)이 시공 중에 있다. 즉, 터널은 문명의 발달과 함께 더 험한 곳에 더 길게 굴착되고 있다. 우리 주변에서도 자의든 타의든 한국과 이웃나라들을 연결하려는 구상들이 진행되고 있다. 즉, “국제 하이웨이”, “철의 실크로드”, “중앙아시아 횡단철도 건설론-세계평화에의 대도”, “유라시아 드라이브 웨이” 등 갖가지 이름으로 명명된 계획들이 구상중 혹은 발표되고 있다.

2 세계의 해저터널

2.1 현황

일본은 1930년대에 간몬 해저터널을 완성한 이후, 세이칸터널, 동경만해저터널 등을 통하여 해저터널 분야의 핵심 기술을 오래전부터 축적해왔다. 대부분의 실드 TBM 장비를 제작·시공하면서 많은 노하우를 축적하였으며 동경만 해저터널을 건설 시에는 실드 TBM 두 대를 해저 지중에서 접합하는 새로운 기술을 시도하여 성공적으로 시공한 노하우를 축적하고 있다.

미국은 1920년대부터 홀랜드 해저터널, 링컨 해저터널 등의 건설을 통하여 해저터널시공에 따른 터널 내부 압력차를 극복하는 방법 등 많은 노하우를 축적해왔으며 현재도 뉴저지와 뉴욕을 연결하는 Trans-Hudson Passenger Rail Tunnel 프로젝트를 진행 중이다. 최근 미국과 러시아는 시베리아의 석유와 천연가스를 파이프라인으로 공급하는 프로젝트의 일환으로 러시아와 알래스카를 연결하는 약 102km의 베랑해협 해저터널 프로젝트 계획을 논의하고 있다.



그림 1. 세계 해저터널 운영/시공계획

영국과 프랑스는 약 200여년간 구상과 연구, 100년이 넘는 지반조사를 통해 영국과 프랑스를 연결하는 Channel 해저터널을 시공하였다. 영국과 프랑스 모두 각각 6개의 쉴드 TBM을 사용하였으며 약 7년간의 공사기간 중에도 다양한 TBM을 설계, 제작하여 기계화 시공에 대한 수많은 요소기술들을 개발, 적용하였다.

노르웨이는 1981년 Vardo에 최초의 해저터널을 건설한 이래 지난 20여년 동안 30개 이상의 해저터널을 시공하였으며 이는 전 세계 해저터널의 절반에 해당하는 개수로 터널건설기술의 선진국이라 할 수 있다. 운용 중인 해저터널은 34개소로 130km에 달하며 그 중 가장 긴 터널은 총연장이 7,931m이며 해저 236m에 위치하고 있다. 이와 같이 노르웨이의 경우엔 수많은 해저터널의 건설 및 운영경험을 통하여 해저지반 조사, 암질불량구간 대처방안, 막장 붕괴 시 조치 등 시공 중 안전과 대형 재해방지를 위한 여러 가지 기술지침들이 개발되었다.

중국이 자체적으로 설계한 최초 해저터널은 Xiamen East 해저도로터널로서 2010년에 완공될 예정이며 터널의 길이는 9km로 이 가운데 바다를 건너는 주요 터널의 길이는 5.95km이다.

한국은 부산-거제간 연결집속도로의 일부 구간인 가덕도와 중족도 사이를 연결하는 구간을 침매터널로 시공 중이며, 침매터널로는 세계 최초로 최대 수심이 48m(기존

45m)에 이르며 함체 1기의 길이가 150m(기존 145m)에 이른다. 그림 1은 전세계의 해저터널 중 주요한 해저 터널의 현황을 나타내었다.

2.2 계획

2.2.1 국외 계획

1) 베링해협 터널

원자재 값의 폭등으로 부유해진 러시아는 알래스카를 연결하는 베링해협 터널을 구상하고 있다. 이 터널은 길이 85km, 수심 55m, 토피 60~70m에 달하며 공사기간 10년, 공사비 200억달러가 예상되는 대형프로젝트이다(그림 2).



그림 2. 베링해협 터널

2) Sicily channel 터널

Sicily channel 터널은 이탈리아 시실리섬과 튀니지를 연결하는 것으로 길이 150km(해저구간 136km)이며 4개의 인공섬을 설치하여 분할 굴착할 예정이다.

3) 중국~대만 해저터널

중국본토와 대만을 연결하는 대만해협 터널은 길이 125~130km이며 예상되는 공사비는 48~60조원에 달한다(그림 3).

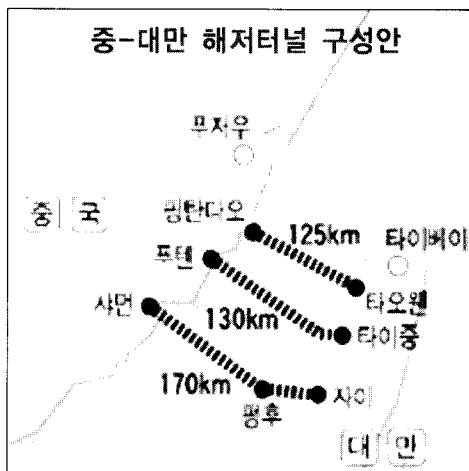


그림 3. 중국~대만 해저터널 구성안

2.2.2 국내의 주요 계획

1) 보령~태안 해저터널

보령~태안 해저터널은 충남 대천과 안면도를 연결하기 위해 1998년 기본계획 수립이후 길이 2.4km, 공사비 4,890억이 소요되는 도로터널이 계획중이다.

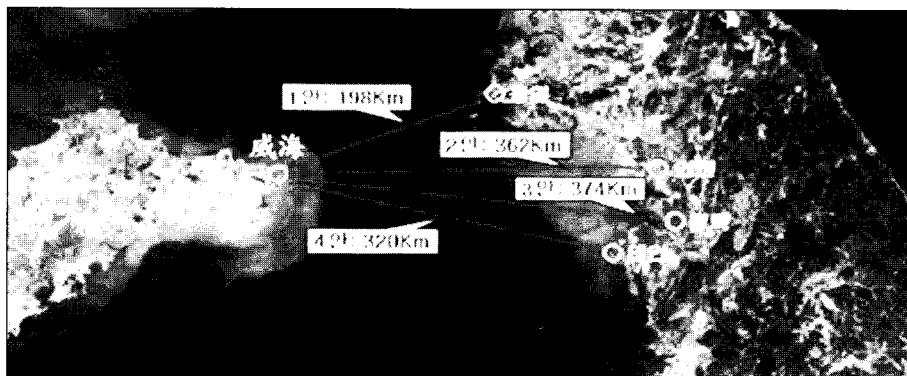


그림 4. 한국~중국 해저터널 예상노선도

2) 완도~제주 터널

완도와 제주를 연결하는 터널로서 길이 109km, 공사비 18조원이 소요될 것으로 예상되며 현재 전남과 제주도가 협정을 체결한 상태이다.

3) 한국~중국 해저터널

한중해저터널은 한국의 인천, 평택, 태안, 군산 등과 중국의 위해를 연결하는 해저터널로서 연장은 인천~위해 362km, 평택~위해 374km, 군산~위해 380km이며, 예상 공사기간 20년, 예상공사비 70~80조원이 소요되는 계획이다. 2008년 경기도 개발 연구원 주체로 공청회가 개최되었다. 현재 기본계획을 작성중이며 다각적인 검토가 이루어지고 있다(그림 4).

3 해저터널 굴착방법

3.1 NATM (New Austrian Tunneling Method)

1) 개요

NATM(New Austrian Tunneling Method) 공법은 터널의 파괴가 전단파괴에 기인한다는 이론에서 정립된 공법으로서 오스트리아의 라브세비치(Rabcewicz)에 의하여 처음으로 암반 터널 시공에 관한 굴착과 지보방법의 기본적인 개념이 체계화 되어 1960년대초에 NATM 공법으로 소개되었다.

NATM 공법은 터널 굴착 후 초기에 1차 지보재(Shotcrete)를 타설하여 원지반 암반의 거동을 초기에 정착시키고 락볼트(Rock Bolt)를 설치하여 주변지반이완 방지 및 암반간의 봉합효과 등을 기대하며 설치된 계층기의 계층결과를



그림 5. NATM터널 막장

분석하여 2차 지보재의 설치 등을 판단하면서 경제적이고 안정된 터널을 설치하는 공법이다(그림 5).

2) 원리

이 공법의 특징은 암반이 스스로 지니고 있는 자체 원지반의 지지력을 이용하여 락볼트(Rock Bolt)로 고정된 후 슛크리트(Shotcrete) 등으로 보강하여 지반을 안정시킨 후 터널을 굴착하는 방식이다. 터널의 원지반 굴착 시 응력과 변형관계는 시간의 함수로서 탄성영역 $\Rightarrow$ 강도약화영역 $\Rightarrow$ 이완영역 순으로 진행되는데 채래식공법은 이완영역을 허용하고, 이완된 지반에 작용하는 하중을 강지보공 및 콘크리트 라이닝으로 지지해 주는데 반해 NATM 공법은 탄성영역 내에서 락볼트(Rock Bolt)와 슛크리트(Shotcrete)를 시공함으로써 원지반의 이완을 방지하고 지지력을 증대시켜 별도의 지보공 없이 원지반이 지보의 역할을 하도록 한 것이다.

3) 특징

지질의 변화에 대응하기 쉽고 팽창성 원지반, 토사원지반, 암반에서도 시공이 가능하며 지질이 복잡하게 변화하는 장대터널에서도 즉시 변경이 간단하다. 또한 계속결과에 의하여 지보의 규모를 결정하므로 경제적인 시공이 가능하며 막장의 지반 변화 점검이 가능하고 단면형상 조정이 용이하다. 또한 장비가격이 싸고 초기 투자비가 적어 경제적이며 터널의 구매 및 곡선반경에 제약이 없다. 하지만 발파로 인해 갱내 작업환경이 불량하며 진동으로 인한 민원의 발생 소지가 많고 여굴이 많아 여굴에 따른 추가공사비가 발생하는 단점이 있다.

3.2 Shield-TBM(Tunnel Boring Machine)

1) 개요

기계화 터널 시공법의 일종으로 터널 단면의 외경보다 약간 큰 강제의 터널 굴착기인 쉴드를 사용하여 지반토사를 수평으로 굴진하면서 굴착한 후 구조물이 되는 복공부재(콘크리트 세그먼트)를 후방에서 조립하여 설치하고, 이 복공부재를 반력으로 활용하여 추진력으로 쉴드를 절진시키면서 터널 구조물을 완성하는 공법이다(그림 6).

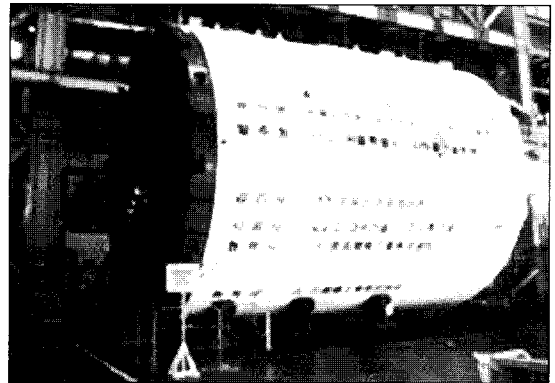


그림 6. Shield TBM 기계

2) 원리

커터헤드를 통해 지반을 굴착해 나가면서 굴착 직후의 내공면위는 쉴드를 통해 억제하고 후방에서 콘크리트 세그먼트를 조립, 설치하여 구조물을 완성해 나가는 방법이다. 설치된 콘크리트 세그먼트는 터널 구조물인 동시에 쉴드를 전진시키기 위해 반력을 얻기 위한 구조물로 사용된다(그림 7).

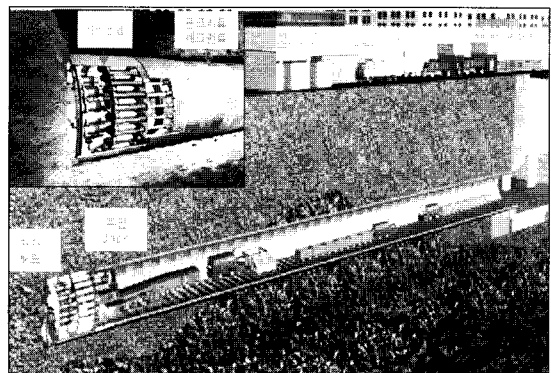


그림 7. Shield TBM 시공도

3) 특징

설드의 직경에 의해 단면이 정해지고 설드에 의해 변위를 억제하므로 정밀한 시공이 가능하며 발파진동이 없으므로 구조물의 근접시공에 유리하다. 정밀시공이 가능하므로 여굴을 최소화 할 수 있으며 굴착에 의한 분진의 발생이 적으므로 작업환경이 좋다. 또한 작업이 일정한 패턴으로 시행되므로 숙련도가 높으며 작업공정의 관리가 용이하다. 설드 자체의 지지효과로 낙반이나 막장의 붕괴로 인한 사고는 드물다. 하지만 장비가 대형이므로 곡선반경에 제약이 있으며 분할시공이 불가능하고 예상되지 않은 지반 조건의 변화에 대한 대처가 용이하지 않다. 또한 장비가 고가이므로 초기 투자비가 크다.

3.3 침매터널

1) 개요

강이나 바다 밑에 트렌치(Trench)를 굴착해 놓고, 작업장에서 침매함(沈埋函: 터널 구조체)을 만들어 해저 터널이 설치될 장소로 운반한 다음, 미리 조성된 트렌치에 침매함을 설치한 뒤 다시 묻어서 터널을 완성시키는 공법이다. 구조물의 콘크리트 품질이 중요한 과제로 콘크리트 크랙 부위의 두께가 0.2mm 이하로 관리된다.

침매공법은 침매함의 모양과 재질에 따라 원형과 직사각형 콘크리트 방식으로 구별된다. 전자는 주로 미국에서 발달한 공법인데, 미리 모래를 깔아놓은 기초 위에 침매함을 직접 묻고 고무 가스켓(Gasket)으로 수중 접합한다. 1910년 미국 디트로이트의 하저 철도 터널에 처음 적용되었다. 후자는 유럽에서 많이 사용하는 공법으로, 침매함의 양끝을 가로대 위에 가설한 뒤 틈새에 모래를 채워넣고 침매함

은 고무 가스켓으로 수중 접합한다. 1937년 네덜란드의 로테르담 항구에 이 공법의 터널이 설치되었다.

2) 원리

본 공법은 침매함에 작용하는 해수의 부력을 이용하기 때문에 함체의 중량에 의한 지반의 침하를 어느 정도 극복할 수 있으므로 지지력이 약한 연약지반 터널 시공 시 용이하다.

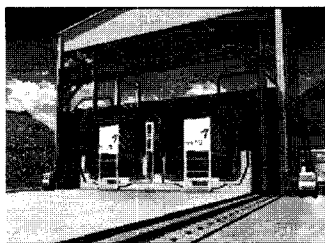
3) 특징

침매공법은 터널에 부력이 작용하므로 겉보기비중이 적고, 지반의 지지력이 크게 필요없어 연약지반에 적합하며, 수심이 깊은 곳에서도 안전하게 공사할 수 있다. 침매함 설치에 걸리는 시간이 짧아 항로(航路)에 대한 제약이 적으며 시공의 효율성이 좋아 공사기간이 단축된다. 하지만 조인트 시공이 불량할 경우 해수가 유입되어 대형사고가 발생할 수 있으므로 정밀한 시공을 해야 하며 높은 수압과 파랑, 태풍 등 열악한 환경에서 시공되므로 높은 기술력이 필요하다(그림 8).

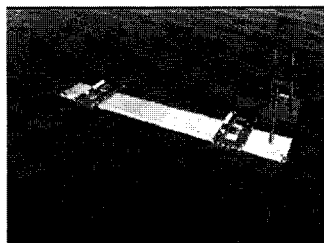
3.4 SFT 공법

1) 개요

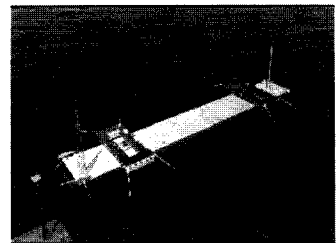
터널을 침매터널과 같이 수중 바닥면을 따라 시공하지 않고 지상의 터널과 동일한 높이로 건설할 수 있다면 운영면에서 터널의 기능은 매우 증대될 것이며 연장을 줄일 수 있어 경제적인 것이다. 이와 같은 요구조건의 만족을 위해 SFT(Submerged Floating Tunnel) 공법이 구상되었으며 현재 여러 가지 형태의 건설방안들이 제안되고 있다(그림 9).



함체의 제작



예인 및 계류



침설 및 접합

그림 8. 침매터널의 시공방법

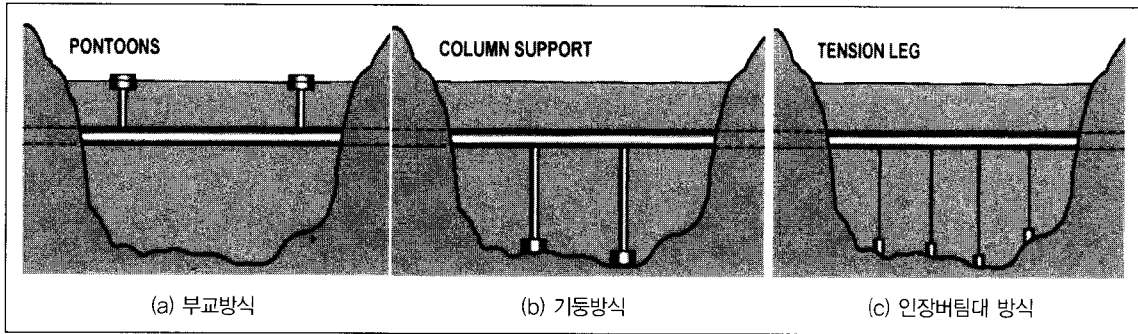


그림 9. SFT 공법의 건설방식 비교

2) 공법의 특징 및 형식

강재나 콘크리트로 만들어진 터널을 부교(Pontoon)나 인장 버팀대(Tension Leg)로 부력을 이용하여 수중에 거치하는 공법으로, 해안이나 호수등에서 원하는 위치에 터널을 건설할 수 있어, 침매터널과는 달리 수중 바닥면 지형의 영향을 받지 않으며 지상터널과도 구배 변경없이 원활하게 연결할 수 있다(그림 10).

3) 적용성 분석

SFT 공법은 현재 구상되고 있는 공법으로 아직까지 적용 사례는 없으며 실제 설계를 위해서는 우선 해결해야 할 많은 과제들이 있다.

- ① 유체상태인 수중에서 터널구조물의 유동 억제 방안
- ② 터널내 필요 부력의 산정 및 제어 방안
- ③ 외부 충격에 대한 대책 방안 등

4 한일터널

4.1 한일해저 터널의 진행상황

한일해저터널에 관한 최초의 발상은 과거 일제시대로 거

슬러 올라가지만 현대적 의미에서의 한일터널은 최근 유라시아 철도네트워크 건설과 관련 지자체(부산, 거제)의 구상, 한일 양국 존임대통령의 제안 등으로 활성화 되고 있다(그림 11). 이와 같은 경위를 간략히 나타내면 표 1, 표 2와 같다.

4.2 한일터널 예상 노선

일본측은 이끼섬, 쓰시마섬 근처의 30개소 보링(12,111m) 데이터로 지질구조를 파악하고 있으며, 암반의 흡수팽창,

표 1. 한국측 진행상황

연 도	주 요 활 동
1992	한일터널 기술연구회 설립
2002	교통개발연구원에서 건교부 용역수행
1990	노태우 전대통령 해저터널 건설 언급
1992	한일터널 기술연구회 창설
1999	'한일의원연맹' 과 공동으로 '한일터널 보고회' 개최
2000	김대중 전대통령 해저터널 건설 언급
2003	노무현 전대통령 해저터널 건설 언급 김현규 전경남지사 타당성 조사 지시
2008	한일해저터널 TF팀 구성(부산시)

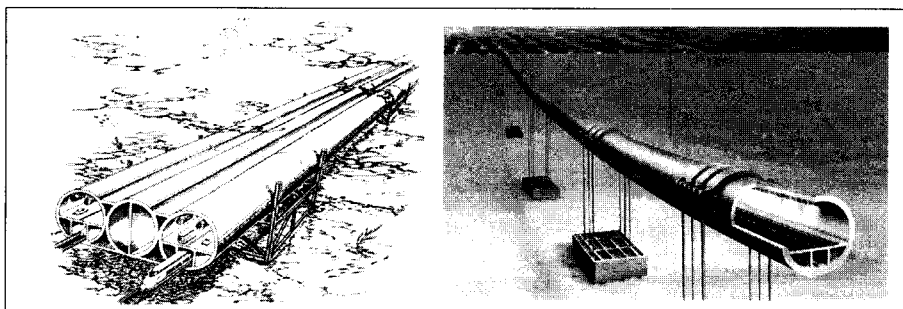


그림 10. SFT 공법의 구상 사례

X선 분석, 선구조, 수문조사를 하고 있으며 중력탐사, 자기탐사, 탄성파 탐사 등으로 지층구조를 조사하고 있다. 위와 같은 조사를 근거로 그림 12와 같은 노선을 제시하고 있다. 이중 A안은 거제~가라쓰를 연결하는 노선으로 대단층을 우회할 수 있으나 해저구간이 가장 길며, C안은 부산~가라쓰를 연결하는 노선으로 가장 긴 노선이나 비교적 직선으로 주행성은 양호하나 대단층을 통과한다는 단점이 있다. 그림 13에는 B안의 지질구조를 나타내고 있다. 이때 세 개 노선의 지질개황은 다음과 같다. 대한해협은 해저부는 제3기층의 대주층군이 기본으로 되어 있으나 한

국쪽에서는 중생대 백악기의 경상층군이라 불리는 지층으로 변하고 있다고 판단되나 명확하지 않다. 한편 대한해협에는 쓰시마섬 서해안에서 5~7km 떨어져 이와 평행하게 단층이 존재하며 제3기 지층이 깊이 함몰되어 있고 이를 채운 연약지반이 존재하는 것으로 알려져 있다(그림 14). 이 함몰은 북부에는 1,200m, 남부에는 500m 정도인 것으로 알려져 있으며 이는 터널 공사 수행중 중요한 포인트가 될 것이다. 대한해협에서는 1991년 2회에 걸쳐 지진도 발생하여 터널의 내진설계도 필요할 것으로 보인다.

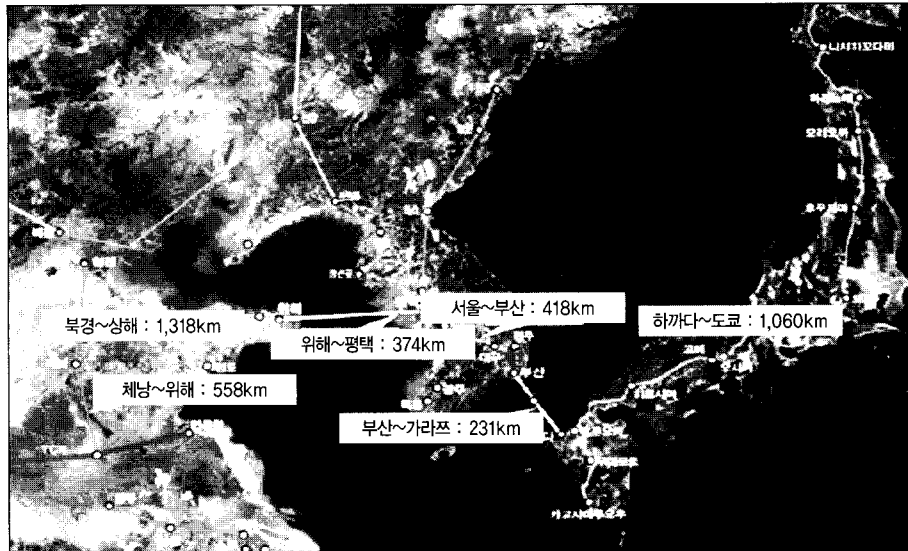


그림 11. 동북아연결 구상철도의 일환으로 한일해저터널 건설 추진(안)

표 2. 일본측 진행상황

연 도	주 요 활 동
1982	한일터널 조사사업위원회 구성 국제하이웨이 사업단 설립(한국, 일본) 해저조사선 진수 기타큐슈, 이끼 등에서 육상보링 개시
1983	일한터널연구회 설립 일부구간에서 간이 전기탐사, 탄성파 탐사 개시 조사용 항공기 도입 육상 중력탐사 개시
1984	이끼섬 및 쓰시마섬 육상 보링 개시
1985	일한터널연구회 심포지움 개최(서울)
1988	국제하이웨이 조사단 중국파견, 합동조사 일한터널 조사사건 2기 공사 착공
2001	일한/한일 의원연맹 한일터널 협의 개시 결정

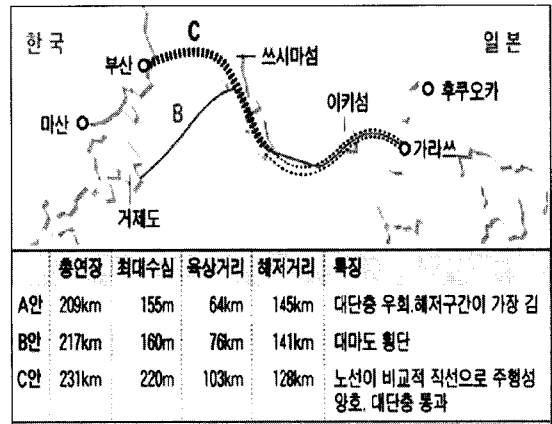


그림 12. 한일터널 예상 노선도

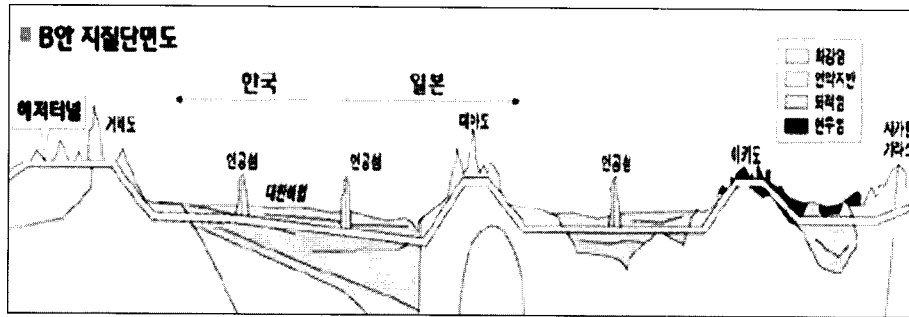


그림 13. B노선의 지질구조도



그림 14. 한반도와 일본의 주요 지각구조

4.3 세계의 장대터널과 한일터널의 비교

한일해저터널을 현재 운영중인 세계최장대 NATM 터널인 Seikan 터널, 최장대 Shield TBM 터널인 유로터널과 비교하면 표 3과 같은 특징이 있다. 즉 지금까지 이루어진 터널 공사중 가장 길고, 가장 수심이 깊으며, 가장 비용이 많이 들어가는 초대형 프로젝트이다. 여기서 먼저 기술적으로 준비해야 할 것은 어떤 방법으로 굴착할 것인가 하는 문제이다. 물론 사전지반조사가 이루어져야 한다. 국내에서도 16km의 솔안터널, 한강하저 Shield TBM터널, 최고 심도의 침매터널 등의 시공이 성공적으로 이루어지고 있는바 한일터널과 같은 고난이도 터널도 충분히 가능하리라 생각된다.

5 결론

한일터널은 과거 식민시대의 대동아 공영권 구상 실현을 위한 수단이었든, 특정 종교에서 제안한 구상이든 우리 눈앞에 현실로 부각되고 있다. 현재까지 한일터널 건설에 따른 한국쪽의 명확한 득실은 파악되지 않고 있다. 계획후 실현까지 200년 걸린 유로터널과 70여년 걸린 세이칸 터널의 사례에서도 볼 수 있듯이 추정공사비 100조원 이상과 20년의 공기가 소요되는 한일터널은 당장 실현될지는 미지수이다. 그러나, 일본이 20년 전부터 한일터널 구간의 지질조사를 수행하고 세이칸터널(NATM), 아쿠아라인(Shield TBM) 등 다양한 터널 굴착공법으로 경험과 기술

표 3. 한일터널과 세계 장대터널의 비교

	Seikan 터널	Euro 터널	한일터널
위 치	(일)혼슈 ~ 홋카이도 연결	영국 ~ 프랑스 연결	부산 ~ 가라쓰 거제 ~ 가라쓰 연결
터널용도	철도터널	철도터널	1안) 자동차 전용도로 2안) 초고속 열차 3안) 리니어 모터카
터널길이	L = 53.8km	L = 51.5km	1안) 209km 2안) 217km 3안) 231km
터널구성	본선타널 1개, 서비스터널 1개 선진도강 1개	본선타널 2개 서비스터널 1개	
굴착공법	NATM	Shield TBM	
수심	최대 140m	최대 60m	1안) 최대 155m 2안) 최대 160m 3안) 최대 220m
공사기간	21년 (1998년 완성)	7년 (1994년 완성)	15년 ~ 20년
공사비	7조원	15조원	85조원 ~ 100조원
지반구성	사암, 화산암류, 단층 연약지반 수반 : 터널굴착에 불리	초코층 : 터널굴착에 유리	신기퇴적암, 대한해협 단층대

을 쌓고 있는 것이 현실이므로 우리는 무엇을 어떻게 준비
해야 하는지 고민해야 할 때이다.

참고문헌

1. 홍성완, 한일해저터널 계획, 터널기술(터널공학회), pp.10-17, 2000.12.
2. 송원경, 김병엽, 이명종, 정소걸, 한일해저터널 어디

까지 왔는가?, KIGAM bulletin, vol. 9, No. 2, pp.74-87, 2003.

3. 배규진, Global and Transportation System의 구상
및 한일해저터널의 건설, 건설기술정보, pp.1-8,
2001.8.
4. http://www.jk-tunnel.or.jp/qa/qa_4.html
5. 김승렬, 지하철의 신기술·신공법, 2006.