

## “ 해저터널 및 해중터널에 대한 이해 ”

팀 명 : The Project of New Pangaea  
팀 원 : 고려대학교 건축사회환경공학부 김지영  
한양대학교 건설환경공학과 이인원

### - 목 차 -

서론

본론

1. 해저터널의 발전과정을 보다 : 세이칸 터널 기념관
2. 해저터널의 발전상을 보다 : 도쿄만 아쿠아라인
3. 우리나라의 현재 기술을 보다 : 터키 이스탄불 유라시아 터널 건설 현장
4. 나라간 해저터널 - 그 문제점과 해결 방안은? : 덴마크 - 스웨덴의 외레순 다리
5. 초장대 해저터널의 유지, 운영. 대안을 찾아서 : 케임브리지대학교 PostDoctoral 서형준 연구원 인터뷰
6. 한국형 해저터널의 길은? : 유로터널을 찾아서
7. 우리나라에서 시공중인 터널 - 현대산업개발 현장 방문 : 인천공항 제2터미널 연결철도 공사 현장

결론

## 서론

한 국가나 도시를 평가할 때 중요한 지표 중 하나는 인프라 시설이다. 인프라 시설은 그 지역의 주민이 얼마나 편리하고 윤택한 삶을 살고 있는지에 대한 지표일 뿐 아니라 국가나 자치제의 재정과 복지에 대한 주요한 지표이기도 하다. 기존 인프라가 부족한 개발도상국은 신규 인프라 시설을 확충해야 하는 상황이고 선진국에는 기존 인프라에 대한 유지보수 및 관리와 새로운 수요와 기능의 변화에 의한 새로운 인프라 시설을 기존 인프라 시설과 상충되지 않게 건설해야 하는 과제가 있다. 이러한 인프라 시설 중 본 탐방단은 선. 후진국을 망라해 세계적으로 많은 프로젝트가 기획 중에 있고 국가와 국가, 대륙과 대륙을 연결한다는 점에서 글로벌 시대에 더욱 각광받고 있는 해저터널에 초점을 맞추어 학술탐방을 실시하였다.

세계화가 진행됨에 따라 지리적인 국경선을 넘어 국가 혹은 도시간의 접근성 향상에 대한 요구가 지속적으로 증가하고 있다. 기존의 항공 및 선박 등의 수단은 물류수송의 증가, 이동편의 증대에 대한 수요를 효과적으로 충족시켜주고 있다고 보기는 어렵다. 이러한 상황에서 해저터널은 바다를 육로로 이어준다는 점에서 대륙 간 혹은 내륙 - 도서 간에 안정적인 교통 및 물류수송체계를 구축할 수 있는 대안으로 평가 받고 있다. 현재 계획 중인 국가 간의 여러 해저터널들이 건설된다면 유럽-아시아-아메리카 대륙이 단선의 육로로 이어질 것이고 이는 바다로 분리된 대륙들이 기원전 3억년 전 하나의 대륙 '판게아'처럼 다시 이어진다는 뜻이다.

한반도는 지리적인 특수성으로 인해 역사적으로 외세의 침략을 많이 받기도 했고 세계 교역의 중심지이기도 했다. 세계화 시대에도 이러한 지리적 중요성은 부각되고 있어 물류수송과 이동수단에 대한 수요가 지속적으로 증가하는 상황이다. 이에 한-일 한-중 해저터널이 계획 중에 있다. 국내에서도 이미 완성된 거가대교 해저터널, 현재 건설 중인 보령, 안면도간 해저터널, 계획 중인 영일만 해저터널 등이 있다. 국가적 차원에서 미래에 더욱 중요성이 증가할 해저터널에 대한 연구와 이해가 필요하기 때문에 본 탐방단은 해저터널에 대한 다각적인 측면과 방식으로 접근해 조사했다.

해저터널에 대한 복합적인 이해를 위해서 몇 가지 키워드를 중심으로 탐방했다. 첫째는 시공법이다. 해저터널의 시공은 크게 침매 방식, NATM 방식 TBM 방식으로 나뉘는데 각각의 방식으로 건설된 해저터널들을 직접 방문해 봄으로써 해저터널의 시공에 대한 탐방을 진행했다. 특히 해저터널이 대부분 TBM 방식으로 건설되기 때문에 TBM 방식으로 이미 건설된 터널 뿐 아니라 동일한 방법으로 시공되고 있는 현장에 직접 방문해서 건설 프로세스를 보고자 하였다. 침매공법은 외레순 다리, NATM 방식은 세이칸 터널, TBM은 유로터널에 각각 사용되었고 현재 시공 중인 터키의 유라시아 터널 역시 TBM 공법으로 건설되고 있다.

두 번째는 유지 및 관리법이다. 해저터널이 다른 구조물과 다른 중요한 특징이 바다 밑에 있다는 점 때문에 작은 사고라도 매우 치명적으로 작용할 수 있다는 것이다. 이러한 특성상 해저터널의 유지관리는 다른 구조물보다 더욱 중요하다고 할 수 있다. 또한 대륙과 대륙을 잇는 해저터널의 경우에는 대륙 사이가 대부분 지진대이기 때문에 해저터널의 지진에 대한 대책도 매우 중요하다. 본 탐방단은 이미 완성된 세계각지의 해저터널을 탐방하여 각자의 해저터널은 어떻게 유지관리하고 또한 방재대책은 어떤 방식으로 운영 중에 있는지 알아보았다.

마지막으로는 프로젝트의 기획 및 운영에 관한 분석이다. 해저터널은 시공과 관리에 천문학적인 금액이 투자되는 프로젝트이다. 천문학적인 금액을 한 국가의 재정으로 감당하기 힘들기 때문에 PF를 받아서 PPP(Public-Priv

ate-Partnership Project)로 진행하는 추세다. 이에 본 탐방단은 현재 진행 중인 유라시아 터널 프로젝트의 사업구조를 살펴볼 것이다. 또한 여러 해저터널은 국가 간을 직접적으로 연결하는 구조물이기 때문에 국가 간의 소통과 협상도 중요한 쟁점이다. 유로터널이나 외레순 다리의 경우가 이러한 쟁점을 잘 해결한 사례라고 할 수 있다. 해저터널은 개통 후에 단순히 교통 통로의 역할뿐 아니라 해저터널 그 자체가 국가 인프라 역량의 상징으로 해마다 수많은 관광객을 끌어 모으는 관광지가 되기도 한다. 기존의 각 나라를 대표하는 해저터널들을 방문해서 향후 대한민국에 건설될 해저터널들을 어떤 방식으로 홍보해야 하는지 힌트를 얻어 보았다.

탐방 후에 8월 27일에 있었던 포니정 재단 하계현장답사로, 실드 TBM공법으로 공사가 진행 중인 인천공항 제2 터미널 연결공사 또한 방문하였다. 현대산업개발에서는 어떻게 실드 TBM으로 공사를 진행하고 있는지 눈으로 직접 보고 확인할 수 있어 이번 해외학술탐방을 통해 배운 점들을 복습하고 주제를 심화시킬 수 있었던 기회가 되었다.

## 본론

### 1. 해저터널의 발전과정을 보다

#### - 탐방 지역

세이칸 터널 기념관(홋카이도 후쿠시마쵸)

#### - 탐방 의의

본 탐방단이 최초로 탐방한 곳은 일본 세이칸 터널 기념관이다. 세이칸 터널 이전에도 많은 해저터널이 있었지만 세이칸 터널은 장대 해저터널의 초기형태를 띠는 것으로 볼 수 있었기 때문에 기념관을 직접 방문하여 그 모습을 확인하고자 하였다.

#### - 탐방 개요

세이칸 터널은 홋카이도랑 혼슈를 잇는 카이쿄선의 터널로 전체길이 53.85km, 수심 240m에 위치한다. NATM 공법과 TBM 공법을 혼합해서 시공된 곳도 있으나 대부분 재래식 공법으로 시공되었다. 1946년부터 시작된 지질조사를 토대로 1971년에 착공하여 1988년에 개통되었다. 요시오카 해저역을 통해 터널 내부를 탐방하려고 했으나 신칸센 확장공사로 인해 해저역이 폐쇄되어 부득이하게 세이칸 터널 기념관만 탐방하였다.



세이칸 터널의 위치 및 전경

- 탐방 결과

1) 세이칸 터널의 시공

약 30년 전에 완공된 해저터널이고 시공 방법도 현재에 비해 재래적이지만 세이칸 터널은 해저면만 고려한다면 아직까지도 가장 긴 해저터널이다. 세이칸 터널의 시공과정은 대단한 난공사였다고 한다. 연약 지질일 뿐만 아니라 공사조건도 매우 나빠 3개의 터널을 뚫고 하나의 갱도에 문제가 생길 때 다른 갱도로 우회하는 식으로 공사를 진행하였다고 한다.

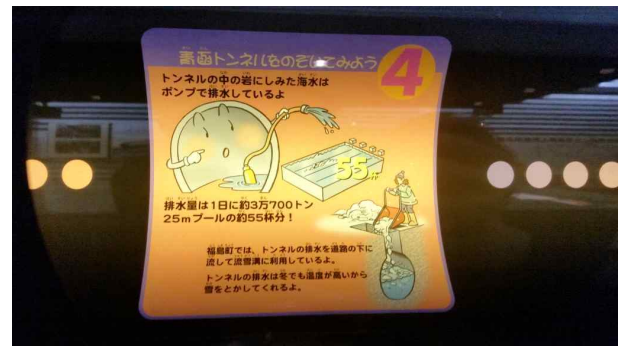
본갱에 침수가 발생하여 사상자가 생기는 경우도 있었고 지반이 너무 약해 뚫을 수 없을 때는 선진도갱을 앞으로 우회시켜 본갱 지층에 응고제를 주입해서 강도를 높인 다음에 뚫는 등 난공사의 연속이었다. 기념관에는 당시 쓰이던 장비들이 전시되어 있었는데 재래식 망치와 곡괭이부터 발파공법에 쓰인 슛크리트 분사기, TBM(Tunnel boring machine) 까지 세이칸 터널을 완공하기 위해서 모든 수단과 방법을 가리지 않았음을 느낄 수 있었다.

	
<p>재래식 공법으로 시공된 세이칸 터널</p>	<p>발파공법에 쓰인 슛크리트 분사기</p>
	
<p>세이칸 터널에 쓰인 레이저 측량 기계</p>	<p>세이칸 터널 시공에 사용되었던 TBM</p>

세이칸 터널에 쓰인 레이저 측량, 세계 최장의 2150m 수평 볼링, 암반이 약한 곳을 보강하는 물유리와 시멘트 밀크를 고압 펌프로 주입하는 지반주입, 판 뒤의 암반을 안정되게 하는 콘크리트 공사 공법이나 록 볼트를 암반에 방사상에 몰두하는 록 볼트 공법 등은 세이칸 터널에서 처음으로 실용화된 기술이다. 세이칸 터널의 시공 자체가 해저터널 시공 기술에 많은 발전을 이루었다고 생각한다. 후에 방문하게 될 유라시아 터널이나 도쿄만 아쿠아라인의 실드 TBM과 비교했을 때 세이칸 터널의 시공은 비록 상대적으로 재래적이고 비효율적으로 보이지만 세이칸 터널의 이러한 경험들을 바탕으로 일본은 현재 해저터널에 있어서 강국으로 평가받고 있다.







해면으로부터 149.5m 밑에 있는, 일본에서 가장 낮은 곳에 있는 역. 일본에서 제일 낮은 일등수준점은 세이칸 터널의 안에 있다. (일등수준점은 지형이나 건물의 높이를 잴 때에 기준이 되는 표시)

터널안의 바위에 스며든 물은 펌프로 빼냄. 배수량은 1일 3만7백톤. 배수한 물은 온도가 높아 겨울철에 하수구에 보내고 눈을 치워서 넣는 방식 이용

※ 세이칸 터널의 설명 및 운영 방식

세이칸 터널을 달리는 모든 열차의 운행 상황은, 하코다테 지령 센터에서 집중 관리된다. 센터에는 각 열차의 위치나 설비의 상태가 정확하게 패널에 표시되어, 열차의 운전기사와 센터의 지령원은 무선에 의해 언제든지 통화할 수 있습니다. 터널의 안전을 위해서 마련되어진 각 방재시설에서의 정보도 모두 자동적으로 지령 센터에 등록되어 있다. 비상시에는 자동적으로 열차를 정지하게 하여 터널 내의 소화 장비, 배기장치, 조명등을 작동하게 된다. 통신은 모두 광케이블을 통해 운영되며 케이블에 문제가 생겼을 시 무선에 의한 예비 시스템이 작동된다. 화재 시에는 열차가 가장 가까운 정점에 정차한 후, 승객들은 통풍이 확보된 피난소에 유도된다. 피난 경로의 전역에는, 조명과 75대의 카메라와 173대의 확성기로 정확한 상황판단과 지시를 한다. 재해시의 정전을 막기 위해 터널 내부에 자가발전장치가 설치되어 있고 지진 시에는 열차는 자동으로 정지한 뒤, 후속 지시에 의해 움직인다.

3) 세이칸 터널의 운영

세이칸 터널은 JR 홋카이도 하코다테지사에 의해 운영된다. 건설에 매우 오랜 시간이 걸렸기 때문에 배를 통해 주로 이동하던 1960년대와 달리, 완공된 1988년에는 항공 교통의 발달로 효용이 좋지 않았다. 시간과 가격의 경제성을 따져 보았을 때 세이칸 터널을 통한 철도 이동은 항공편에 비해 비효율적이기 때문에 현지인들은 거의 이용하지 않는다. 하지만 야간침대열차와 관광열차는 전략적으로 여러가지 컨셉과 테마를 바탕으로 많은 관광객을 끌어 모으는데 성공했고 예매를 하지 않는 이상 티켓 구입조차 힘들 정도로 인기가 많다고 한다. 대표적인 예로 침대특급 <카시오페아> 열차가 있다. 움직이는 호텔로 불릴 만큼 호화롭고 프랑스 요리가 제공되는 다이닝 카, 별하늘을 볼 수 있는 라운지 카 등을 설치해 세이칸 터널의 횡단을 단순한 이동의 의미를 넘어서 추억과 관광의 한 과정으로 만들었다는 데에 의의가 있다. 이러한 침대 열차 뿐 아니라 최근에는 일본의 초고속 열차인 신칸센이 다닐 수 있도록 보수 공사 중에 있다. 내년에 공사가 완공되면 신칸센이 다니게 되고 침대차는 줄어들겠지만 경제적으로 많은 이득을 얻을 수 있을 것이라고 생각된다. 세이칸 터널 이용의 대부분은 사실 화물차의 이동이다. 홋카이도와 혼슈의 물자 수송의 상당량이 이 세이칸 터널을 통해 이루어진다. 기후가 좋지 않은 홋카이도에서 선박과 항공은 물자 수송에 효율적인 수단이 아니지만 철도는 매우 효과적이고 완벽한 운반책이기 때문에 세이칸 터널은 화물 수송에 있어서 제 몫을 다 하고 있다고 볼 수 있다.

#### 4) 총평

첫 방문지인 일본의 세이칸 터널은 후에 보게 될 다른 해저터널들에 비해 재래적인 시공 방식으로 시공되었기 때문에 과거의 방식을 볼 수 있어서 의미가 있었다. 터널 내부에 스며든 따뜻한 물을 지상의 눈을 녹이는 데에 쓰는 방법은 매우 지혜롭다고 생각한다. 또한 세이칸 터널에서 가장 주목할 부분은 바로 그 당시의 기준에서는 미래의 열차인 신칸센을 염두 해두고 시공이 이루어졌다는 것이다. 이처럼 초장대 해저터널의 공사는 세기의 공사로, 운영기간이 수 십 년 이상 되어야하기 때문에 미래의 교통수단에 대한 대비 또한 이루어져야 된다는 것을 알 수 있었다.



그 당시 현재의 일반 열차, 미래의 신칸센

유지 관리 부분에서는 시공 중에는 비효율적인 다중 갱도 방식이 유지 관리에는 효과적으로 사용되고 있는데 실드 TBM으로 시공된 다른 해저터널들과 유지 관리 부분을 비교하여 초장대 해저터널에 대한 모델을 제시할 것이다. 해저터널의 단점으로 공사비에 비해 비경제적이라는 의견이 많은데 향후 국내에 해저터널 시공 시 세이칸 터널의 운영 방식을 본받아 전략적으로 관광 상품을 만든다면 충분히 해결할 수 있는 문제라고 생각한다.

## 2. 해저터널의 발전상을 보다

### - 탐방 지역

도쿄만 아쿠아라인

### - 탐방 의의

본 탐방단이 두번째로 방문한 해저터널은 가나가와 현 가와사키 시와 지바 현 기사라즈 시를 잇는 아쿠아라인 해저터널이다. 세이칸 터널이 초장대 해저터널의 시작이었다면 도쿄만 아쿠아라인은 한층 더 진보된 기술을 보여주는 해저터널로 볼 수 있었다. 우리와 이웃나라인 일본의 해저터널 발전과정 및 현재 기술 수준, 여러 가지 활용 방안 등을 파악하여 초장대 해저터널 건설을 위한 발판으로 삼을 것이다.

### - 탐방 개요

아쿠아라인은 일본 국도 제409호선의 일부로 세이칸 터널과 달리 차량이 통과하는 터널이다. 연장 15.1km

(가와사키 쪽 9.6km는 터널, 기사라즈 쪽 4.4km는 다리)이며, 4차선 도로다. 1조 4409억 엔의 사업비로 1997년 12월 18일 개통되었다. 인공섬 2개소가 환기용으로 사용되고 있으며 인공섬을 우미호타루 라는 고속도로 휴게소로 사용 중이다. 시공부분에서는 이수식 쉴드 TBM 공법을 사용하였다고 한다. 세이칸 터널은 견학이 불가할 뿐만 아니라 기차 전용 터널이지만 도쿄만 아쿠아라인은 가와사키 역에서 고속 버스를 타고 이동함으로써 터널과 터널 안을 이루고 있는 대피시설 및 환기 시스템을 엿볼 수 있었고 인공섬인 '우미호타루'와 그 안에 위치한 기념관을 방문해 보았다.



인공섬 우미호타루의 전경



기념관 전경

- 탐방 결과

1) 아쿠아라인의 기술

아쿠아라인은 세이칸 터널과 달리 쉴드 TBM과 침매공법의 혼합으로 건설되었다. 8년의 기간 동안 8대의 쉴드TBM을 동시에 굴착하여 지중접합 하였다. 아쿠아라인의 공사 방식은 세이칸 터널과 근본적으로 다를 수 있었고, 같은 나라의 해저터널이지만 20여년동안 해저터널 기술이 비약적으로 발전했음을 알 수 있었다. 아쿠아라인도 완공된 지 20여년이 지났지만 현재의 기술과 크게 다르지 않았으므로 보아 일본의 해저터널 기술력이 얼마나 대단한지 알 수 있었다. 시공 방식은 다음과 같다. 두개의 인공섬을 먼저 건설하고 인공섬 중심으로부터와 터널 구간 양 끝점으로부터 동시에 쉴드 TBM으로 굴착하여서 지중접합해서 완공했다. 굴착동안 인공섬은 쉴드 TBM 발전기지로 활용되었다.



환기탑이자 쉴드 TBM의 시작점, 아쿠아라인 입구인 UKISHIMA



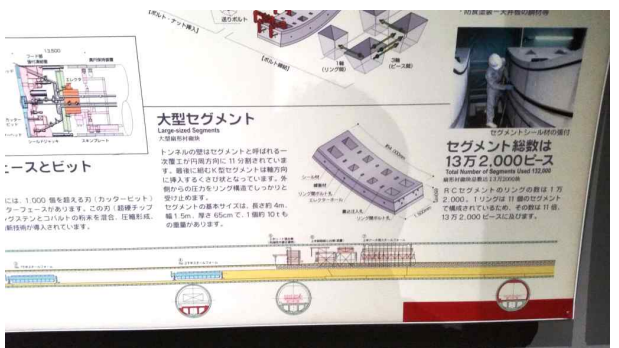


환기 및 실드 TBM의 시작점으로 사용 중인 KAZENO TOU

동경만의 지반은 연약지반에 고수압이 작용하여 터널 굴착에 매우 좋지 않은 조건이다. 인공섬 건설 시 지반이 너무 약해 지지기반 층을 굴토한 뒤에 단단한 흙을 채워서 기초공사를 했다. 아쿠아라인은 실드 슬러리 TBM방식을 사용하였는데 14.14m의 지름의 실린더가 회전하면서 지반을 굴착하면 고압의 슬러리가 작업하는 동안 터널의 붕괴를 막아주는 역할을 했다. 굴토된 흙은 뒤로 보내 터널 밖으로 운반하고 터널 벽은 실드 TBM이 1.5m 나아갈 때마다 미리 준비한 11조각의 pc(precaster concrete)파츠로 접합하여 완공했다. 이러한 일련의 터널 시공 과정은 모두 자동화로 진행되었다. 우미호타루에는 굴착 시 사용되었던 실드 TBM의 디스크 커터가 전시되어 있다.



아쿠아라인 시공 당시 사용되었던 실드 TBM의 디스크 커터



실드 TBM을 이용한 시공 과정에 대한 설명

## 2) 아쿠아라인의 유지보수 및 방재대책

여러 개의 터널로 환기시설, 피난 시설을 운영하던 세이칸 터널과 달리 아쿠아 라인에 사용된 공법, 즉 실드 TBM으로 굴착 시에 터널은 원형 모양이 되는데 실제로 자동차가 지나다니는 부분을 제외하면 하부에 많은 공간이 남게 되고 아쿠아라인은 이를 적절하고 효율적으로 운영하고 있었다. 아쿠아라인은 TBM으로 시공된 직경 14.1m의 터널 단선으로 이루어져 있기 때문에 비상시에 터널 외부로 대피하는 방법 대신에 4차선 도로 밑의 공간으로 미끄럼을 타고 내려가 대피하는 방식을 채택하였다. 또한 차량 터널로 주요 사고가 차량 교통사고인 만큼 구급차와 긴급 정비 차량도 터널 밑 공간을 통해 사고지점으로 긴급히 지원할 수 있도록 설계하였다. 터널 밑 공간에는 대피시설 뿐 아니라 각종 전기장치 및 제어장치가 있어서 터널의 유지 보수의 핵심 공간으로 자리 잡고 있다.



터널의 단면



화재발생시 피난로(아래 대피로로 이동 가능)

철도 터널과 달리 차량 터널의 특징은 배기가스가 많기 때문에 짧은 구간일지라도 환기시설이 매우 중요하다. 아쿠아라인의 환기시설은 시공 때부터 사용된 두 개의 인공 섬을 주축으로 해서 이루어진다. 터널 내부에 환기 통로를 만들어 공기가 지나다니는 길을 설정하고 두 개의 인공섬 환기시설에서 터널 내부의 공기를 모아 밖으로 배출하고 신선한 공기를 집어넣어 터널 내부의 공기를 깨끗하게 유지한다.



환기 시설에 대한 설명

## 3) 아쿠아라인의 운영

아쿠아라인은 일본 국도 제 409호선의 일부로 동일본고속도로주식회사에 의해 관리되고 있다. 아쿠아라인은 지리적 위치상에서의 이점이 충분히 있는 터널이라고 볼 수 있다. 아쿠아라인이 연결하는 가와사키와 기사라주를 터널을 통과하지 않고 이동할 시 110km인데 터널 통과 시에는 30km정도로 단축된다. 또한 도쿄와 요코하마를 잇는 차량 통행량이 많은 지리적인 위치 상 경제성이 충분히 확보 된 터널이다. 아쿠아라인 운영의 요점은 단순한 터널이 아니라 터널에 관광명소를 인공적으로 조성해서 성공적으로 운영하고

다는 것이다. 아쿠아라인의 인공섬 우미호타루에 5층짜리 휴게소가 설치되어 있다. 인공섬은 기본적으로 환기탑으로 쓰이고 있는데 인공섬을 크게 확장해서 휴게소 및 아쿠아라인 기념관을 조성해서 운영하고 있다. 아쿠아라인의 총 연장 길이는 15km 정도로 필수적으로 휴게소가 필요한 길이는 아니라는 점에서 우미호타루의 운영은 필요에 의해서 라기 보다는 전략적인 선택이라고 볼 수 있다. 세이칸 터널 기념관은 접근성이 매우 불리한 위치에 있어 토목기술의 발전상을 알리고 관광효과를 증진시킬 수 있는 실효성이 거의 없다고 볼 수 있다. 하지만 아쿠아라인 기념관은 휴게소 내부에 위치하고 있어 접근성도 좋고 일반인들도 쉽게 관람할 수 있도록 기념관을 조성했다는 것은 매우 영리한 선택이라고 생각한다. 이미 우미호타루는 도쿄에서 꼭 가보아야 할 관광지로 알려져 있을 만큼 터널을 홍보하고 관광산업 활성화에도 성공했다.

#### 4) 총평

세이칸 터널에 이어 일본을 대표하는 동경만 아쿠아라인을 방문하였다. 시공 방법에 있어서 세이칸 터널보다 훨씬 진보한 기술을 볼 수 있었고 단일 터널 내의 환기와 방재 방식, 아쿠아라인의 전략적인 운영 방식을 볼 수 있었다. 일본은 해저터널의 막대한 공사비, 다소 비효율적일 수 있는 경제성에도 불구하고 끊임없이 도전하여 현재의 해저터널 강국이 되었다. 지금은 경제성이 없어 보이는 한. 일 해저터널이나 한. 중 해저터널 역시 새로운 기술의 발전과 창의적이고 합리적인 운영 방식, 도전정신이 있다면 실현시킬 수 있을 것이다.

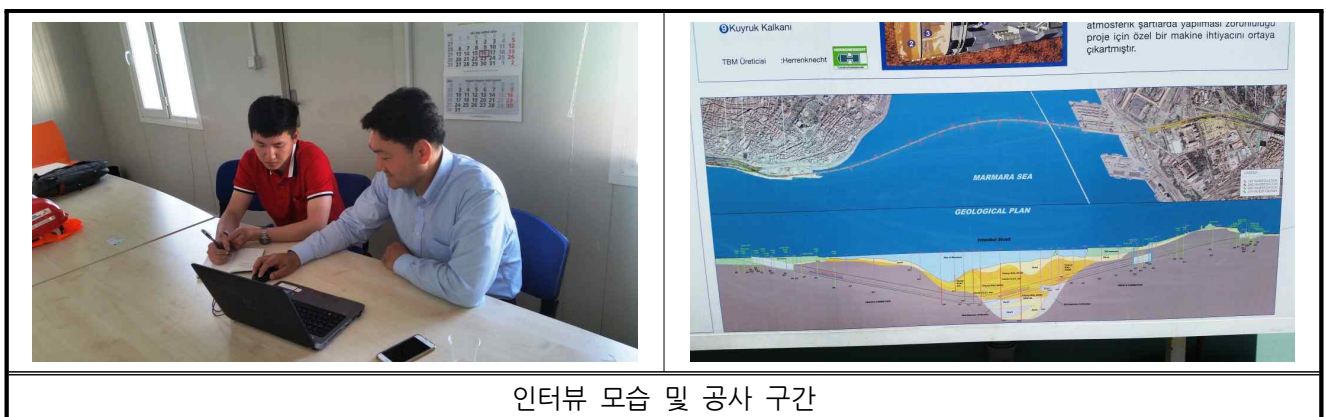
### 3. 우리나라의 현재 기술은 어떨까 - 우리나라 기업이 시공 중인 현장을 찾아가다

#### - 탐방 지역

터키 이스탄불의 유라시아 터널 건설 현장

#### - 탐방 의의

이어서 방문한 터키의 유라시아 해저터널은 한국 기업이 단순히 입찰을 받아 시공하는 것에 그치는 것이 아니라 sk건설에서 PF를 직접 받아서 SPC와 EPC를 동시에 추진한 최초의 해외 PPP 사업이라는 큰 의미를 갖는 현장이다. 터널의 굴착 현장을 직접 견학할 수 있어서 탐방을 통해 이론적으로만 알 수 있던 해저터널에 대해 심도 깊은 이해를 할 수 있었다. 본 탐방단에게도 유라시아 터널은 유럽과 아시아 대륙을 잇는 판게아 프로젝트의 대륙 간 터널 중 첫 단추가 되는 터널이기 때문에 이번 탐방은 의미가 남다르다고 볼 수 있다.



인터뷰 모습 및 공사 구간

#### - 탐방 개요



유라시아터널의 견학에는 sk건설의 김동휘 부장이 유라시아터널 spc사인 ATAS에 기술부장으로 현재 근무 중으로 본 탐방단의 현장 견학에 도움을 주었다. 유라시아 해저터널은 유럽과 아시아 대륙을 잇는 해저터널로서 아쿠아라인과 유사한 실드 TBM 방식과 일부 NATM으로 시공 중에 있다. 터널 뿐 아니라 터널 진입 도로도 확장공사 중에 있다. 현재는 TBM 굴착이 90% 정도 완료된 상태이고 내년 3월에 개통을 목표로 하고 있다.



**- 탐방 결과**

1) 유라시아 터널의 필요성

유라시아 터널이 위치한 보스포루스 해협은 폭이 좁기 때문에 교량의 설치도 가능한 구간이다. 하지만 이스탄불은 페르시아 문명으로부터 오스만투르크 제국까지 수천년간의 동서양 역사의 보고이기 때문에 대규모의 진입로가 필요한 교량은 자칫 문화재와 경관을 해칠 수 있다. 또한 흑해와 지중해를 잇는 주요한 선박 항로이기도 하기에 다수의 교량은 대형 선박의 운행을 방해할 것이다. 보스포루스 해협은 한강보다도 폭이 좁지만 교량의 다수 설치가 불가능한 상황이다. 하지만 이스탄불의 인구수는 서울보다도 많은 1400만명으로 유럽지구와 아시아 지구 간의 이동에 대한 필요성은 매우 높은 상황이다.



보스포러스 해협을 횡단하는 방법은 현재 세 가지가 있는데 1) 해저터널을 통해 지하철로 이동, 2) 보스포러스 1, 2교를 통한 차량이동, 3) 선박을 통한 이동 이다. 이미 이스탄불에는 Marmaray라는 이름의 해저터널을 통과하는 지하철 노선이 존재한다.

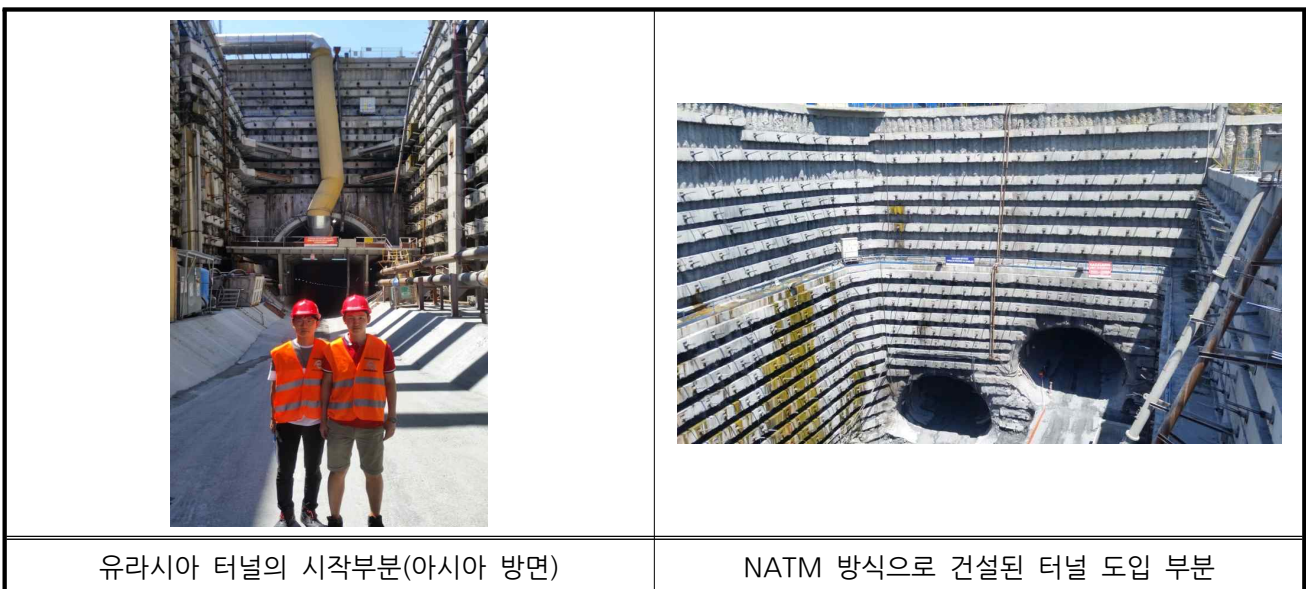


Marmaray 노선에는 해저터널을 지나고 있다는 설명문이 곳곳에 부착되어 있다

하지만 이는 이스탄불의 교통 정체를 해결하는 데는 한계가 있을 수밖에 없고, 보스포러스 1, 2교는 항상 심각한 교통체증을 수반하여 횡단하려면 1시간 이상의 시간이 소요된다. 선박을 통한 이동은 선박의 간격과 한번에 이동할 수 있는 인원을 고려해 본다면 비효율적이라고 볼 수 있기 때문에 새로운 방법의 이동 수단이 필요한 실정이다. 이러한 상황에서 차량용 해저터널은 문화재 및 자연경관 훼손이 없고 늘어나는 수요를 충족시켜 줄 수 있는 최적의 방식이다.







## 2) 유라시아 터널의 시공법

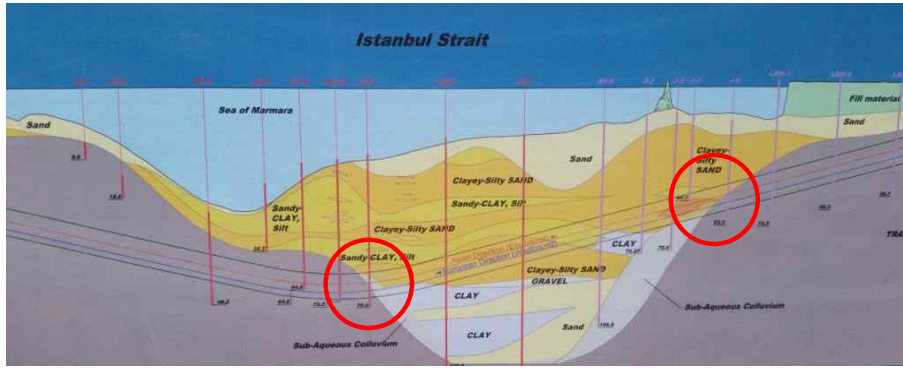
유라시아 해저터널은 기본적으로 아쿠아라인에 쓰인 쉴드 TBM 방식을 근간으로 하고 있기 때문에 이번 탐방에서는 새로운 기술에 초점을 맞추기 보다는 실제로 쉴드 TBM을 직접 보고 어떤 식으로 터널이 완성되어 가는지 실제 현장을 체험한다는 것에 의의를 두었다. 외경 13.7m, 길이 120.0m, 중량 3300톤의 TBM 한대가 단독적으로 굴착을 해 나가며 보스포러스 해협 3.34km의 해저구간을 잇는다.





TBM 시공 방식은 다음과 같다. TBM 본체가 디스크 커터를 회전시키며 암반을 파내어간다. 이때 전방에 벤토나이트가 투입되어 압력을 유지시켜서 터널의 붕괴를 막는 역할을 한다. 벤토나이트는 굴착된 암반과 뒤섞여서 배출되고 다시 벤토나이트를 분리하는 플랜트 공정을 통해 분리된 깨끗한 벤토나이트가 다시 투입되는 과정을 반복해서 굴착을 진행한다. 굴착이 2m 진행될 때마다 두께 60cm 의 세그먼트를 투입해서 터널 외벽을 만든다. 터널이 완전 암반층까지 내려가 있는 것이 아니라 점토층을 통과하기 때문에 다른 해저터널에 비해 작용하는 수압이 강하기 때문에 이례적으로 두께 60cm의 두꺼운 세그먼트를 사용한다.(보통 사용되는 세그먼트의 두께는 30cm이다.) 세그먼트는 나사를 통해 연결되고 틈새는 방수 개스킷으로 접합되어 터널의 방수를 완벽하게 유지한다. 암반과 흙의 경계부에는 seismic joint segment라는 변위가 발생했을 시 가변적으로 대응할 수 있는 특수 제작한 세그먼트를 사용해 지진이 잦은 보스포러스 해협의 내진 설계도 보강하였다. 세그먼트가 접합되면 TBM은 세그먼트를 밀면서 굴착을 진행한다. 터널은 초대형 테이블폼 거푸집을 이용해 복층으로 만들고 1,2층 각 2차선씩 차량용 터널로 운영된다. 2층 하부 공간에는 전자 및 제어장비가 지나가는 통로로 사용된다.

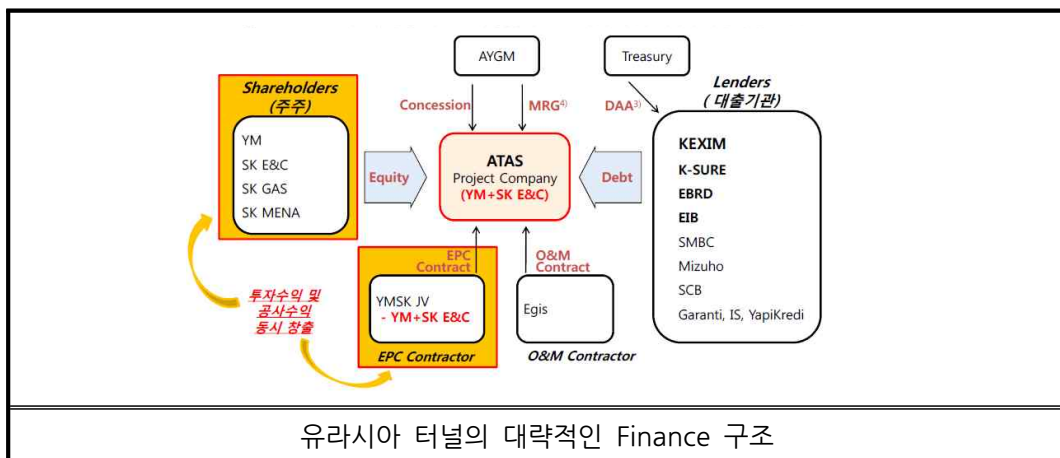
	
<p>벤토나이트 처리 플랜트</p>	<p>터널 시공에 사용될 세그먼트</p>
	
<p>TBM 시작 부분</p>	<p>실드 TBM은 세그먼트를 압축하는 힘을 추진력으로 전진</p>
	
<p>seismic joint segment</p>	<p>유라시아 해저터널 단면</p>



seismic joint segment가 설치된 암반과 토질 사이의 경계

### 3) 유라시아 터널 운영

유라시아 터널은 터키 현지 회사인 YM과 SK건설이 합작한 PPP(Public-Private-Partnership)사업이다. 건설 기간 4년 운영기간 24.25년으로 2017년 4월에 개통하여 2041년 6월 까지 운영한 후에 터키 정부로 양도된다. SK와 YM은 SPC 합작회사 ATAS와 EPC 합작회사 YMSK JV를 운영한다. SPC(Special Purpose Company), EPC(Engineering Procurement Construction)가 모두 포함되어 있기 때문에 수익률은 그만큼 보장받는 사업이다. 총 사업은 12,45만불의 프로젝트로서 자금조달은 민자 PF(Project Financing)를 통해 이루어진다. KEXIM, KSURE등의 한국 공공금융기관들도 PF에 적극적으로 참여하여 총 자금의 48%를 조달한다. 한국 금융 기관 뿐 아니라 EIB, EBRD등의 투자은행들도 참여한다. 손실을 최소화하기 위해 터키 AYGM으로부터 사업권 및 최소수익을 보장받는다. 최소수익(MRG, Minimum Revenue Guarantee)은 250만대/year을 기준으로 통행량이 미달될 시에는 차액을 보상받는다. 또한 사업진행이 불가한 상황이 발생할 경우에 터키 재무부에서 채무를 인수하는 조건이 붙어있다. 이러한 수익을 최대한 보장하고 위험부담을 최소화 하는 사업을 잘 구성해서 유명 financial magazines 및 journals로부터 best PPP deal을 4차례 수상하였다. 이러한 방식으로 프로젝트를 진행할 수 있는 이유는 앞서 언급했듯이 수요가 매우 크고 터키 정부에게 채권이나 재정만으로 부담이 될 수 있는 사업을 민간자본을 통해 부담을 줄여주는 방식을 잘 구성했기 때문이다. 터키 정부는 재정 부담을 덜고 sk건설은 건설 및 운영을 통한 이익창출 및 초대형 TBM 터널 기술력 확보, 터키 시민들에게는 꼭 필요한 새로운 인프라 시설 확충의 서로에게 'win, win, win'이 되는 프로젝트라고 할 수 있다.



유라시아 터널의 대략적인 Finance 구조

#### 4) 총평

PPP사업의 규모는 지난 10년간 대폭 증가했으며 개도국 정부는 재정 부담을 덜고 사업 효율성을 높이기 위해 PPP방식의 인프라 투자를 늘리고 있다. 그동안 플랜트에만 집중했던 한국의 건설 회사들도 향후 이러한 PPP사업을 확장해야 한다는 필요성을 느끼고 추진 중에 있다. 유라시아 터널 프로젝트는 대한민국 1호 PPP사업이라는 의의가 있고 기술력에서 충분히 경쟁력이 있는 한국의 건설 회사들에게 뼈를 깎아먹는 저가 수주의 늪에서 벗어나 새로운 활로가 되었으면 하는 바람이다.

### 4. 두 나라를 잇는 해저터널, 문제와 해결 방법은?

#### - 탐방 지역

덴마크 - 스웨덴의 외레순 다리

#### - 탐방 의의

세이칸 터널과 동경만 해저터널, 유라시아 해저터널 현장 견학을 통해 해저터널에 사용되는 발파식 공법과 TBM 공법에 대해 알아보았다. 지반 자체에 균열이 생길 수 있는 NATM 공법의 경우 수압이 상당한 해저터널에는 적합하지 않고 TBM 공법이 더 안정적이고 암반 위 토질층으로도 굴착할 수 있다는 장점이 있어 해저터널에 적합한 공법이라고 할 수 있다. 덴마크와 스웨덴을 잇는 외레순 다리에서는 일반 터널에도 쓰이는 발파식 혹은 TBM 공법과 달리 해저터널에 특화된 침매식 공법에 대해 알아보았다. 침매터널은 육상에서 제작한 각 구조물을 가라앉혀 물속에서 연결시켜 나가는 공법으로 만드는 터널이다. 대표적으로 외레순 다리와 국내에 있는 거가대교가 이러한 침매식 방식으로 건설되었다.

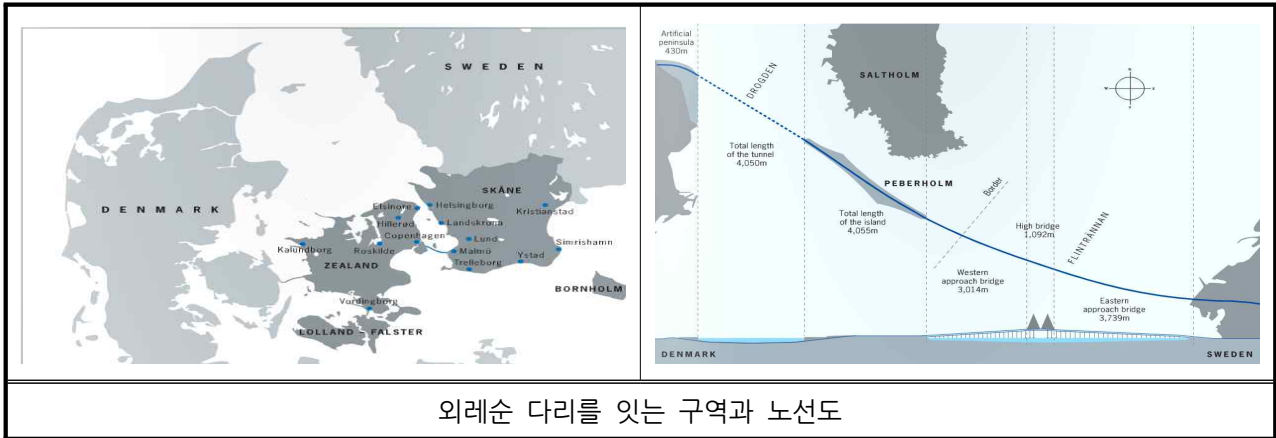
#### - 탐방 개요

외레순 다리의 관리 회사는 A/S Storebælt 사로, 관리 페이지를 통해 연락하여 인터뷰와 견학을 진행하려고 하였지만 회사에서 보안상의 이유로 거부하여 실질적인 견학은 불가하였으나 담당 직원으로부터 외레순 관련 자료를 받을 수 있었다. 외레순 다리는 덴마크의 코펜하겐과 스웨덴의 말뫼를 잇는 외레순 해협을 통과하며 덴마크와 스웨덴을 연결하는 도로4차선 및 복선 철도 교량터널이다. 총 길이는 7845m이며 사장교에서 인공섬 페버홀름을 통해 드로그덴이라는 해저터널로 이어지는 독특한 구조를 갖고 있다. 사장교에서 해저터널로 이어지는 이유는 원활한 선박 통행량 보장과 덴마크 쪽 코펜하겐 공항이 해안에 위치해 있기 때문에 높이가 높은 사장교의 주탑에 비행기가 부딪힐 위험을 방지하기 위한 것이다. 이에 따라 해저터널은 덴마크 쪽에 위치하고 있다.

#### - 탐방 결과

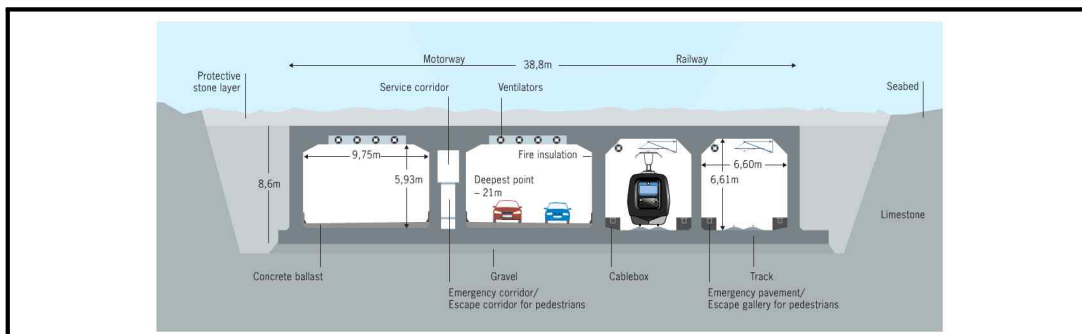
##### 1) 침매공법

외레순 다리가 이전 해저터널들과 다른 가장 큰 특징은 침매공법으로 시공되었다는 점이다. 침매공법이 처음으로 시공된 것은 100여년전 이지만 아직까지도 매우 어렵고 복잡한 시공법이라고 평가받고 있다. TBM 공법과 다른 점은 터널의 모양을 지정할 수 있어서 효율적인 공간 사용을 가능하게 한다는 점이다. 유라시아 터널의 경우 직경 13m의 거대 터널을 굴착해서 복층 도로 4차선이 지나는데 외레순 다리의 경우에는 철도 2차선, 차량 도로 2차선, 비상구 1차선을 수평 배치해 공간의 낭비 없이 구성되어 있다. 또 다른 장점은 지층 밑으로 들어가야 하는 해저터널들과 달리 침매터널은 바닥 표면에 시공되기 때문에 구간 자체를 줄일 수 있는 장점이 있다.



외레순 다리를 잇는 구역과 노선도

침매공법은 몇 가지 큰 과정으로 나뉜다. 먼저 바닷물을 막아서 만든 도크에서 거대한 콘크리트 박스 구조물을 제작한다. 이것이 바로 침매항체로 외레순 다리에는 20개의 침매항체가 사용되었다. 항체가 완성되면 도크를 열어 부력의 힘으로 바다 위로 띄운 다음 침매터널 구간으로 옮겨져 가라앉힌다. 외레순 다리의 경우 해안 해저에서 2차대전 당시 투하된 불발탄이 16개나 발견되어 제거 작업을 진행했고 침매터널의 노선이 어긋나서 이를 수정, 보완하느라 공사 기간이 지연되기도 했다. 침매터널 이음부는 고무 개스킷으로 압착시켜서 바닷물이 새는 것을 막았다. 또한 항체 자체의 무게가 대단히 무겁기 때문에 이에 따른 지반 침하를 예측하고 자갈층 기초로 보강하는 작업도 하였다. 침매터널의 역사는 길지만 이렇게 대규모인 경우는 세계적으로도 외레순 다리와 거가대교, 일본의 나하 터널 정도가 전부인데 이유는 위에 나열한 건설과정에서 사고 발생 확률도 높고 작업 자체가 해저 깊숙한 곳에서 이루어지기 때문에 사고 확률도 높고 조인트 부분에서는 난공사가 진행될 확률이 높다. 또한 지반층에 따라서 시공 자체가 불가능한 경우도 있다는 단점이 있다.



해저터널의 단면도



해저터널 침매항체 운반 과정



침매 터널은 아예 교량이 시공 불가능해서 해저터널로 대체하는 경우를 제외하고는 교량을 설치하는 것보다 장점이 많다고 볼 수 있다. 침매터널은 교량에 비해 공사비가 적게 들고 미관적 측면에서 교량은 기존 구조물이나 자연환경을 훼손하는 데에 비해 침매터널은 이러한 부분에서 장점이 있다고 볼 수 있다. 또한 특수한 목적이 있을 경우 (외레순 다리의 경우 항공장애 예방, 거가대교의 경우 군사적 목적) 등 교량보다 유리한 경우가 많고 시공 과정이나 관리 과정에서 환경을 해치지 않는 친환경적인 토목 구조물이다. 이러한 장점들로 침매터널은 차세대 토목 구조물로 평가받고 있지만 시공 과정의 어려움은 극복해야 할 과제이다.

2) 문제에 대한 해결, 인공섬 Peberholm

외레순 다리의 덴마크 측에는 코펜하겐 공항이 위치하고 있다. 사장교로 건설된 외레순 다리는 주탑이 자칫 하면 비행기 운행에 지장을 초래할 수 있어 안전성을 담보해야만 한다. 이에 대한 해결책은 바로 덴마크와 근접한 구역에는 해저터널을, 나머지 부분은 교각으로 건설한다는 것이다. 그렇게 된다면 교각과 해저터널을 잇는 연결수단이 필요한데 외레순 다리에서는 시공과정에서 인공섬 Peberholm을 통해 이런 문제를 해결하였다. 지난 일본의 사례에서는 인공섬을 환기 및 쉴드 TBM의 발진 기지로 활용하였다. 하지만 외레순 다리에서는 환기 문제보다는 연결성에 초점을 두었고, 넓은 인공섬 부지를 친환경적 공간으로 만들게 된다. 구조적인 부분에서 살펴보자면 앞에서와 같이 한 쪽은 차량, 다른 한 쪽은 열차가 다닐 수 있도록, 인공섬에서는 양 쪽으로 차량, 가운데에서 열차가 다닐 수 있도록 건설되었다.  $0.9km^2$ 의 면적의 인공섬은 해저의 재료로 건설되었고 스웨덴 서쪽 해변에서 공수된 화강암이 섬을 보호하고 있다. 인공섬을 건설할 당시 수백여종의 식물의 씨앗들을 인공섬에 심었고 나머지는 바람이나 새가 운반하는 과정을 통해 인간의 손을 거치지 않는 자연적인 섬을 만드는데 성공했다. 그래서 다양한 종류의 새들이 인공섬을 기반으로 번식하여 환경적인 가치 또한 매우 크다고 할 수 있다.



외레순 다리의 친환경적인 인공섬의 전경

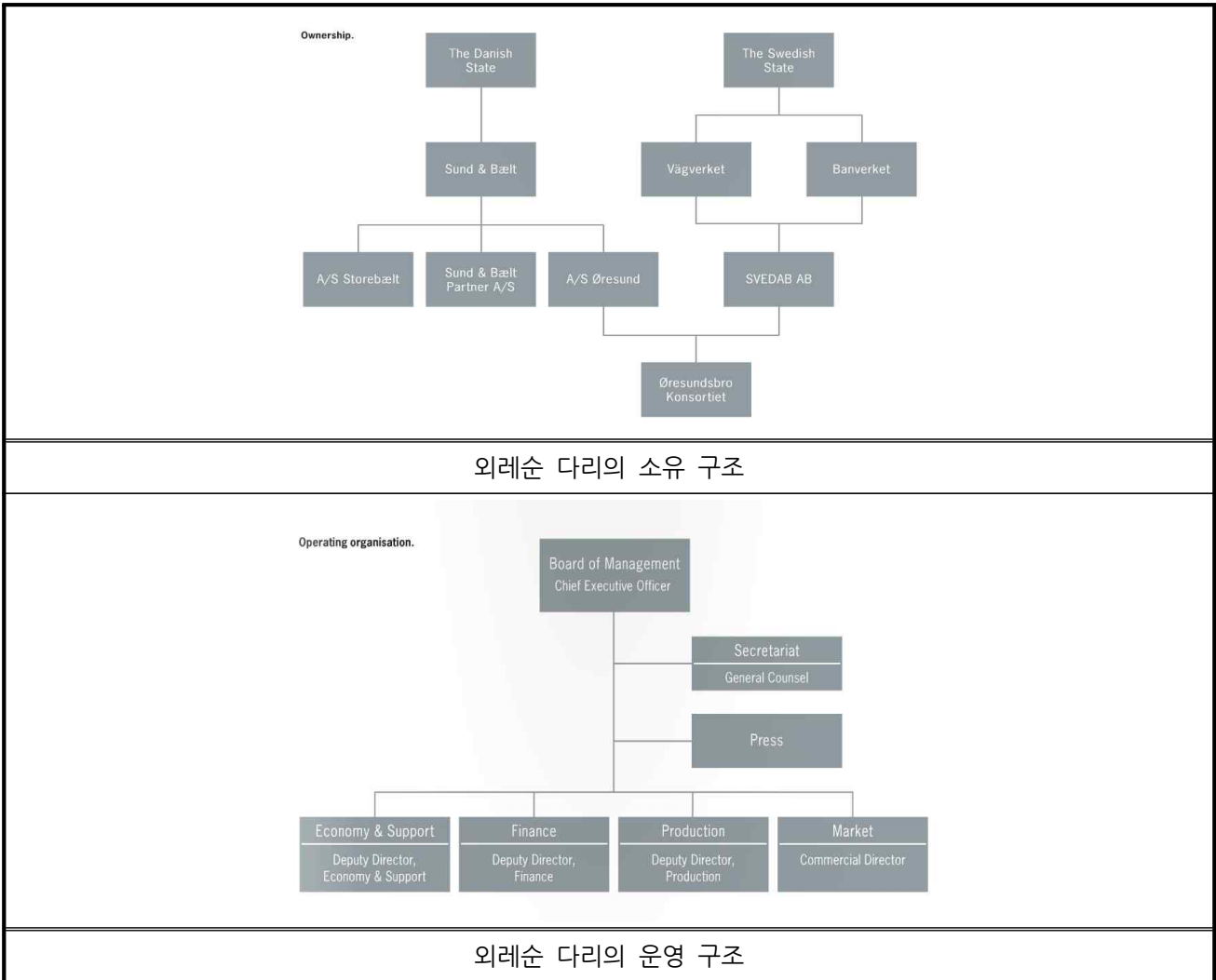


인공섬의 내부 모습



### 3) 두 나라간의 소통

외레순 다리는 덴마크와 스웨덴 사이를 직접적으로 잇는 구조물이고 계획 과정에서 두 나라 정부 간의 원활한 대화와 소통이 이루어 졌기 때문에 프로젝트가 성공적으로 진행되었다. 덴마크와 스웨덴 모두 EU에 속한 국가이기 때문에 협상 과정에서 원활함은 있었으나 반대 여론도 많았다. 이유를 보면, 금주 국가인 스웨덴은 다리 건설로 인해 술, 담배, 밀수품이 급증할 것을 우려했고 덴마크는 코펜하겐이 스웨덴을 피해 건너온 알코올 중독자들의 피난처가 될 것을 걱정했다. 또한 역사적으로 스웨덴의 말뚝을 포함한 최남단의 스칸디나비아 지역은 800년간 덴마크의 지배를 받은 곳으로 두 지역 간의 정서적 앙금도 한몫 했다. 양 국 수산업자들의 반대, 환경주의자들의 반대 등 계획 과정이 순탄치 만은 않았다. 하지만 외레순 다리는 착공 7년 만에 준공되어 현재는 이러한 우려를 모두 잠재우고 성공적으로 운영되고 있다. 외레순 다리는 관리 회사에 의해 운영되고 있으며 지분은 덴마크와 스웨덴 정부가 반반씩 소유한다. 건설 비용은 총 301억 덴마크 크로네가 들었고 스웨덴 측에서 94.5억 덴마크 크로네를 추가로 지불하여 말뚝 도시 터널을 건설하였다. 통행량이 수입원이고 2035년까지 투자비용을 회수할 전망이다. 국경 문제는 쉐겐 조약에 의해 국경 통과 절차는 없지만 서로 다른 양국의 교통 체계가 문제되었고 결국 열차는 시속 200km 이하로만, 국경 통과 시 즉시 각 나라의 교통 체계를 따르는 방법으로 협상하였다. 이러한 협상 과정을 통해 외레순 다리는 1999년 8월에 완공되었고 완공을 축하하기 위해 덴마크 왕자 프레데릭과 스웨덴 공주 빅토리아가 다리 한 가운데서 상징적인 만남을 가졌다.



#### 4) 총평

개통 초기에는 비싼 통행량 때문에 교통량이 적었으나 2005년부터 교통량이 증가했는데 이유는 코펜하겐에 비해 매우 저렴한 스웨덴의 부동산 가격에 덴마크 인들이 말뚝에 거주지를 옮기고 출퇴근 하는 형식으로 속속 이사를 하는 바람에 교통량이 늘어나게 되었다. 이에 말뚝의 경제 사정 또한 좋아졌고 퇴락한 항구 도시에서 스웨덴의 중심 도시로 성장하는 계기가 되었다. 우려했던 역사적 문제에 의한 주민간의 갈등은 서로의 교류가 많아지자 오히려 없어지고 코펜하겐과 말뚝의 주민들은 굳이 국적을 들먹이지 않고 '외레순 사람'이라는 이름 아래 조화롭게 살고 있다. 외레순 다리의 공사비는 양 국 정부가 30년에 걸쳐서 회수하지만 국가 간 경제적, 문화적 시너지의 효과는 단기간에 긍정적인 방향으로 진행중에 있다. 이러한 외레순 다리의 효과는 국가간 인프라 산업의 훌륭한 롤 모델이 되었고 우리나라가 계획중에 있는 한일 해저터널, 한중 해저터널 사업 진행시 좋은 벤치마킹 사례가 될 것이다.

### 5. 초장대 해저터널의 유지·운영, 다른 방식은 없을까?

#### - 탐방 세부 주제

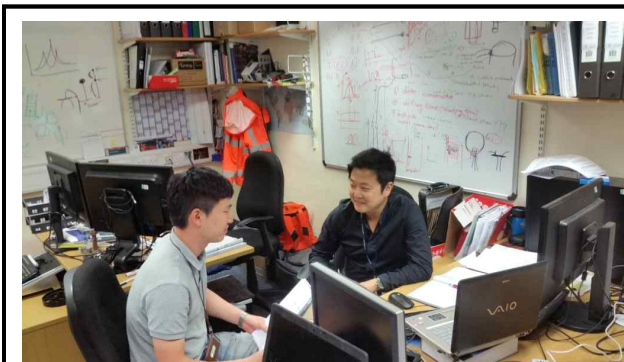
해저터널의 유지, 운영 관리

#### - 인터뷰 장소 및 대상

케임브리지 대학 포닥으로 근무 중인 서형준 연구원

#### - 탐방 의의 및 개요

세계의 각 해저터널들을 방문함으로써 해저터널의 세가지 시공법(NATM공법, TBM공법, 침매공법)에 대해 알아보았고 각각 터널의 운영 및 유지관리에 대해서도 조사하였다. 해저터널 시공법은 계속해서 발전해왔으며, 해저터널의 운영과 유지관리는 각 터널의 설계상의 특성과 국가, 지리적인 특성에 맞게 적용되고 있음을 알 수 있었다. 해저터널 프로젝트는 대규모 프로젝트이고 공사 기간이 길기 때문에 해저터널에 대한 기술들은 미리 개발해서 현장에 적용한 사례도 있지만 세부적인 기술은 프로젝트의 진행 중에 발생하는 문제를 해결하기 위해 프로젝트에 맞는 기술들이 개발된 경우가 많았다. 궁극적으로 앞으로 초장대 해저터널 프로젝트를 계획하고 시공한다면 현재 시공 중에 있는 유라시아 해저터널 보다 더 발전된 시공법 및 운영방법으로 진행되어야 할 것이다. 따라서 본 탐방단은 영국 케임브리지 대학의 지반 연구소의 서형준 박사를 만나 현재 터널 분야에서 연구 중에 있는 최신 기술에 대해 알아보았다.



케임브리지 대학 랩실 안에서 인터뷰를 가졌다.

## - 탐방 결과

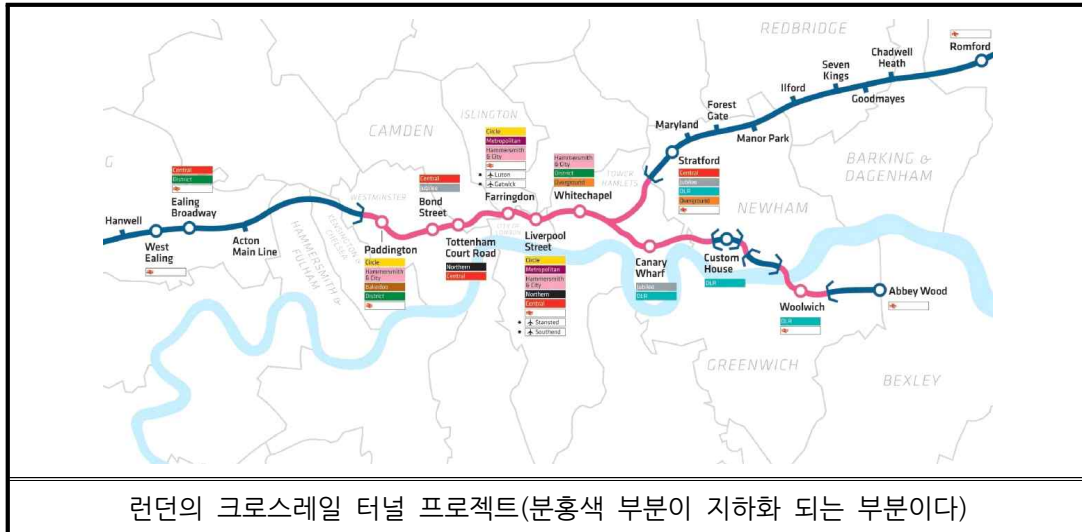
### 1) 크로스레일 터널의 배경

영국의 교통체증은 세계에서 가장 심각한 수준이다. 850만에 이르는 인구가 런던에 살고 있지만 4차선을 넘는 도로를 찾아보기 힘들고 지하철은 매우 작고 협소하여 출퇴근 시간에는 지하철을 타는 것조차 불가능에 가깝다고 한다. 이는 런던의 도로 정비는 빅토리아 시대에 이루어졌고 지하철도 개통된 지 150여년이 지났기 때문이다. 150여 년 동안 런던의 인구는 4배 가량 증가했다. 다른 나라였다면 도심지 재개발을 통해 도로를 넓게 확보하고 지하철도 확장공사를 통해 교통체증을 줄였겠지만 영국은 한번 건설된 구조물에 대해 (특히 가장 찬란했던 빅토리아 시대의 것에 대해) 대단히 보수적인 입장을 취하고 있기 때문에 도로와 지하철 확장공사를 못하고 런던은 세계 최악의 교통체증 도시로 남게 되었다. 본 탐방팀이 지하철을 직접 체험해본 결과, 배차간격은 좁더라도 한 번에 많은 수의 사람을 나를 수 없어 결과적으로 교통체증이 필연적이라는 사실을 확인할 수 있었다. 이처럼 영국 정부에서도 더 이상 교통체증을 감당할 수 없는 처지에 이르자 2009년부터 런던의 동서남북을 관통하는 크로스레일 터널 프로젝트를 진행 중이다.



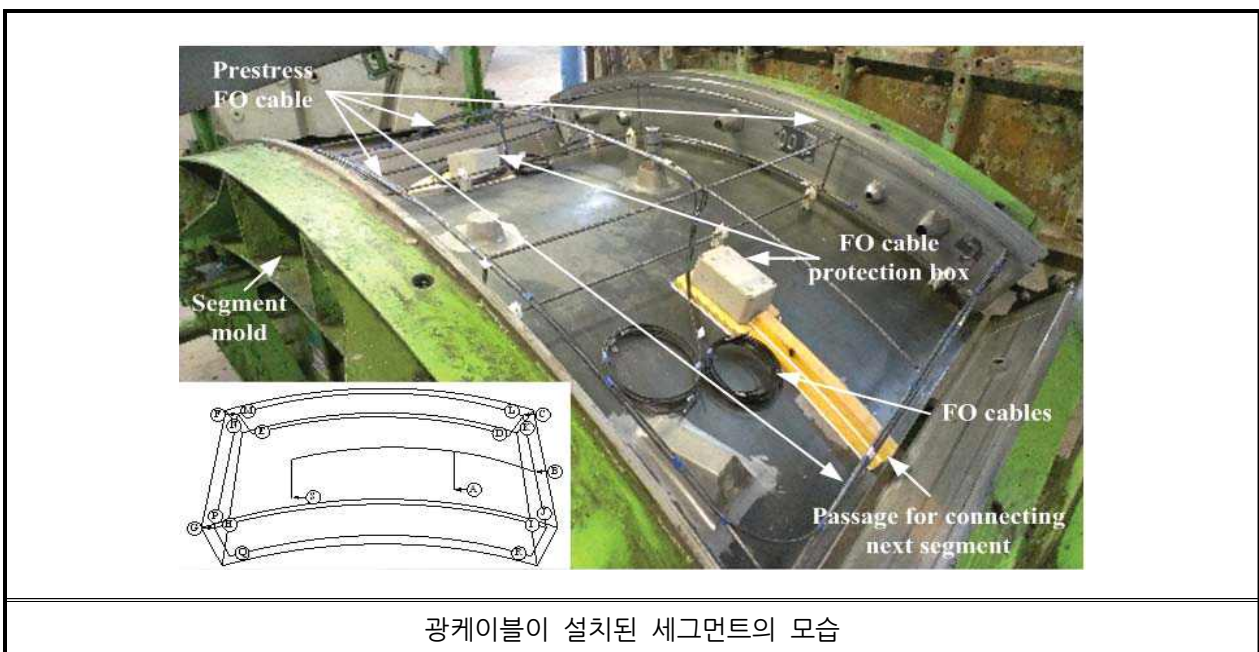
런던의 지하철 노선도 및 좁고 낙후된 지하철의 모습

크로스레일 터널 프로젝트는 런던 도심을 직접 관통하는 42km의 지하터널을 건설하여 도시 외곽의 기존 철도노선과 연결하는 사업으로 10년의 기간을 두고 건설 중에 있다. 탐방단이 방문한 케임브리지 대학의 지반 연구소에서는 이 프로젝트에 직접 연구단으로 참가하여 여러 가지 연구를 진행 중이었다. 크로스레일 터널은 TBM 공법으로 진행 중에 있어 이 프로젝트 자체가 해저터널은 아니지만 해저터널에 보편적으로 사용되는 TBM공법에 대한 연구라는 점에서 해저터널에도 적용될 만한 기술들이 있다. 현재 가장 활발히 진행 중인 연구는 광섬유를 이용한 세그먼트 변형을 측정 기술이다. 크로스레일 프로젝트의 큰 문제점 중 하나가 런던의 건물들이 대부분 빅토리아 시대 이전에 지어져 말뚝이나 지하공간에 대한 기록이 부족하다는 것이다. 2차 대전 당시 런던 지하에는 수많은 방공호가 지어졌는데 이 또한 지하공간에 대한 정보 부족으로 이어져 터널 시공 중에 설계와 오차가 발생하는 경우가 많아서 프로젝트에 난항을 겪고 있다. 이에 세그먼트 조립 이후의 정교한 변형을 측정을 할 수 있는 방법으로 개발된 것이 광섬유를 이용한 변형을 측정 기술이다.







## 2) 광섬유를 이용한 변형률 측정

광섬유를 이용한 세그먼트 변형률 측정법은 다음과 같다. 세그먼트를 타설할 때 광섬유케이블을 종, 횡 방향으로 놓고 타설한다. 이때 프리스트레스를 가해서 케이블이 완전히 일직선이 되도록 한다. 세그먼트 조립 이후에 광섬유 센서에 신호를 보내면 빛이 반사되어 나오는데 이때 세그먼트에 변형률에 따라 각 지점의 출력되는 빛의 주기와 파장이 다르게 되고, 이를 다시 분석하여 세그먼트의 인장, 압축, 전단, 비틀림에 대한 변형을 분석하는 방식이다. 온도 측정 케이블도 같이 타설하여 온도 변화 또한 측정한다. TBM 세그먼트에서 가장 중요한 하중이 실드 TBM 기계가 세그먼트를 밀고 나아갈 때 발생하는 램 하중인데 이 램 하중이 가해질 때 실시간으로 변형률과 온도를 측정할 수 있다는 장점이 있다. 또한 광섬유 케이블을 사용하기 때문에 터널의 길이에 관계없이 모든 지점의 변형률을 동시에 측정할 수 있고 터널 완공 후에도 4~5년 동안 시간에 따른 하중의 변화와 크리프에 의한 변형률 또한 즉각적으로 수용할 수 있다. 이미 현장 실험을 거쳐 크로스레일 프로젝트에 투입 되었고 터널 뿐 아니라 말뚝이나 일반 구조물에도 유용하게 사용될 수 있다는 점 또한 알게 되었다.





	
<p>1. 터널 굴착</p>	<p>2. 세그먼트 설치</p>
	
<p>3. 각각의 광섬유 케이블 연결</p>	<p>4. 데이터 습득</p>

※ 광섬유 케이블의 설치 과정

### 3) 총평

해저터널은 건설 과정도 매우 높은 수준의 기술이 필수적이지만 그것보다 더 중요한 것은 바로 완공 후에 이루어지는 유지, 운영이다. 해저터널의 경우에도 예상치 못한 사고가 많이 일어나고 한 번의 대형 사고는 감당하기 힘든 피해로 이어지기도 한다. 때문에 위의 기술이 적용되어 지점별 변형률을 실시간으로 측정할 수 있다면 실제 현장에 큰 도움이 될 것이라고 생각한다. 케임브리지 대학 뿐 아니라 노르웨이의 지질 연구소, 대한민국의 해저터널 연구단과 같은 세계의 수많은 연구소에서 터널에 관한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 해저터널에 관한 연구들은 해저터널의 시공을 효율적이게 할 것이며 공사비와 공사 기간을 효율적으로 단축하여 이전에는 불가능했던 해저터널 프로젝트를 실현시킬 것이다.

## 6. 한국형 해저터널의 길은? - 유로 터널에 대해 알아보다.

### - 탐방 의의

현재 대한민국에서 논의 중인 한·일, 한·중 해저터널 프로젝트와 비교했을 때 터널의 규모나 프로젝트 진행과정, 해저터널이 미칠 파급효과 등이 가장 유사한 해저터널이 바로 이 유로 터널일 것이다. 한·일, 한·중 해저터널 프로젝트가 진행된다면 유로 터널의 사례가 가장 많이 참고가 될 것이다. 유로 터널의 사례를 분석하여 장점은 본받아 현실에 맞게 적용시키고 단점은 답습하지 않는 형태로 대한민국에도 대륙적 랜드마크가 될 수 있는 국가 간의 해저터널이 건설되었으면 하는 바람으로 탐방에 임하였다.



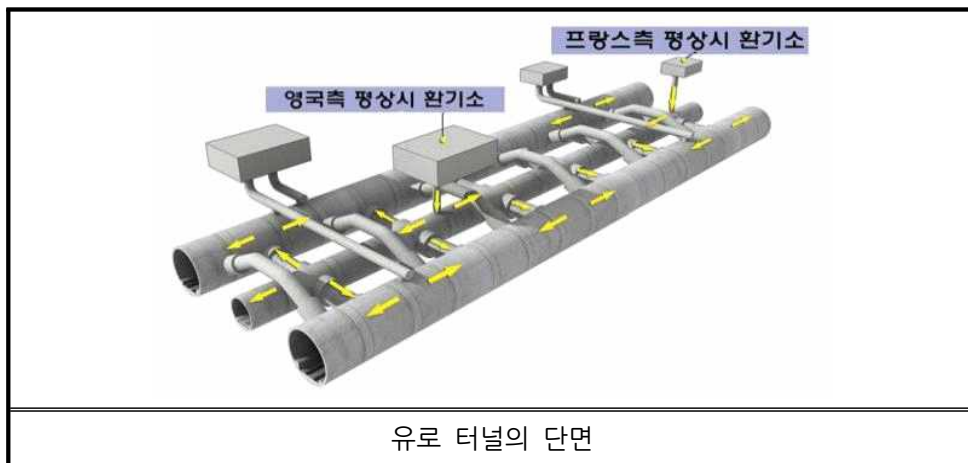
## - 탐방 결과

### 1) 유로 터널 프로젝트 개요

채널 터널이 개통된 것은 1994년인데 최초로 프로젝트가 진행된 것은 1870년경이다. 이 무렵에 양국에서 터널 시공을 위해 지질 조사를 하고 터널회사를 설립하여 총 4km정도의 터널을 굴착했지만 양국에서 반대 운동이 일어나 결국 영국의회에서 반대한다는 결의를 내 공사가 중단되었다. 그 뒤로도 여러 차례에 걸쳐 터널이 논의되었지만 착수되지는 않다가 1984년 영국 총리 대처와 프랑스 대통령 미테랑의 파리회담 중 합의에 성공해 건설인가에 관한 조약이 체결되어 유로터널이 개통되기에 이르렀다. 주로 사용된 공법은 쉴드 TBM공법이며 유로터널이라는 민간 회사를 설립해 건설하고 관리한다. 채널터널은 순수 민간 자본만으로 건설되었는데 건설 도중 발생한 문제들로 예상보다 건설 기간도 길어지고 자본도 50억원이 더 투입되어서 심각한 자금난에 허덕여 파산 직전에 이르렀지만 최근에는 자금상황을 안정화시켜 성공적으로 운영 중에 있다.

### 2) 유로 터널의 구조적 특징

영국 포크스톤으로부터 프랑스 칼레지방 사이의 도버해협을 연결하는 철도터널로 유로스타라는 기차가 터널을 통과한다. 터널의 구조는 직경 7.6m의 러닝 터널 2개와 그 사이를 지나는 직경 4.8m의 서비스 터널 1개로 구성되어 있다. 총 길이 50.45km로 일본 세이칸 터널 보다는 짧지만 해저 부분은 세이칸 터널보다 23km나 길어 세계에서 가장 긴 해저부분을 가진 터널이다. 시공에는 150억 달러의 건설비가 사용되었다. 여기서 주목할 부분은 바로 환기시설의 유무이다. 유로터널의 경우에는 그 길이가 매우 긴 편에 속함에도 일본의 아쿠아터널과 같이 환기시설을 위한 인공섬이 존재하지 않는다. 대신 유로터널에서는 주 터널 사이의 보조터널과 그를 연결하는 연결터널을 통해 환기 문제를 해결하고 있다. 환기 시설은 영국과 프랑스 각각 1개소씩 설치되어 있고, 대피 시설인 연결통로는 375m마다 설치되어 있어 사고 발생 시 승객들이 연결통로를 통해 보조 터널 및 다른 주 터널을 통해 안전하게 이동하도록 설계된 것도 눈에 띄는 부분이다.



### 3) 유로 터널 프로젝트의 의의 및 문제점

유로 터널은 장대형 해저터널 중 두 나라를 잇는 유일한 터널이기 때문에 그 자체만으로도 토목사업에 있어서 큰 의의를 갖는다. 하지만 유로 터널 프로젝트가 성공적인 프로젝트였다고 보기는 힘들다는 의견도 만만치 않다. 유로 터널을 운영하는 유로 터널사의 채무는 무려 90억 달러에 이르고 2009년에 영업 이익이 2억 8천만 유로였는데 2억 유로가 이자를 상환하는데 사용되었다고 한다. 터널 건설 당시 예상기간 보다

1년이 길어졌고 시공 도중 예상치 못한 문제가 많이 발생하면서 공사비용이 50억 달러 이상 초과되었다고 한다. 이는 대규모 해저터널을 반대하는 입장의 근거가 되기도 한다.

예상치 못한 문제는 개통 뒤에도 계속되었는데 예상하지 못한 터널 속 지열로 인해 기차가 제대로 달리지 못하는 상황이 발생하기도 했고 터널 내의 화재사건, 유로스타의 갑작스러운 고장으로 승객들이 14시간동안 터널에 갇혀있는 사건도 발생하였다. 이에 여러 차례 터널이 폐쇄되기도 했고 복구를 위해 막대한 자금이 투입되었다. 저가항공사의 등장도 유로 터널 운영을 어렵게 하는 요인이다. 유로 터널의 강점은 불편하고 느린 선박 대신에 빠르고 편리하게 이동한다는 것인데 저가항공이 등장하면서 비슷한 가격으로 더 빨리 이동할 수 있는 대체재가 생겨버린 것이다. 이러한 어려움이 있었지만 런던과 파리를 2시간 만에 직접적으로 이동한다는 비교 불가능한 장점을 바탕으로 수요가 지속적으로 증가하여 현재 유로터널은 자금순환이 원활이 이루어지고 있다. 유로터널을 통해 영국에서 몰던 차량을 프랑스에서도 운전할 수 있을 뿐만 아니라 시내와 어느 정도 거리가 있는 공항과는 달리 기차역은 시내에 위치하고 있다는 장점으로 이용객들을 유치한 것으로 보인다. 이를 통해 유로터널의 자금난은 어느 정도 극복한 것으로 보이지만 최근에는 터널을 통해 영국으로 밀입국하려는 난민들에 관한 문제가 대두되고 있다. 2015년 7월 28~29일에만 난민 2000여 명이 유로터널로 진입을 시도해 경찰과 충돌하여 두 명이 숨지고 수 백 명의 난민이 체포되었다. 유로터널 사는 올해만 난민 3만 7000여명의 밀입국을 저지하였다고 발표했다. 영국과 프랑스 당국은 막대한 자금을 사용하여 터널 입구 주위에 방벽을 치고 경찰병력을 동원중이지만 터널을 통해 밀입국하려는 난민은 계속해서 증가하고 있다.

#### 4) 총평

육로를 통해서가 아닌 바다를 건너서 국가와 국가를 잇는 경우는 이미 외레순 다리를 통해 알 수 있었다. 하지만 유로 터널은 4면이 바다로 이루어진, 섬 국가인 영국과 대륙인 프랑스를 이었다는 사실만으로도 충분히 토목 분야에서 가치 있다고 생각한다. 건설된 지 20여년이 지났음에도 불구하고 해저 부분 세계 최장 터널이라는 타이틀을 유지하고 있을 뿐만 아니라 수많은 시행착오를 겪긴 했지만 큰 인명피해 없이 사고에 대처한 부분들도 향후 우리나라가 해저터널을 건설할 때 주목할 만한 부분이다. 하지만 구조적인 부분에서 보자면 최근의 터널과는 다르게 구조가 매우 복잡하다. 효율적인 공사를 진행하기 위해서라도 터널 구조를 단순하게 설계하는 것은 필수적이라고 생각된다. 또한 경제적인 측면을 보자면 예상치 못한 사고들, 저가항공사의 등장 등으로 자금 운영 상 어려운 점들이 많았다고 한다. 따라서 앞으로 우리나라가 해저터널을 건설할 때는 미래의 교통수단이 어떻게 발전할 것인지를 파악하고 수요의 정확한 예측을 통해 문제들을 유연하게 대처할 수 있는 터널을 건설하는 것이 필수적이라고 생각한다. 또한 터키의 경우와 같이 시공사와 운영사가 수익을 보장받을 수 있도록 하는 funding structure을 세우는 것이 중요할 것이다.

## 7. 우리나라에서 현재 시공 중인 터널은? - 현대산업개발이 시공 중인 현장을 방문하다.

### - 탐방 지역

인천공항 제2터미널 연결철도 공사 현장

### - 탐방 개요

해외학술탐방 후 참여한 포니경 재단 하계현장답사에서 인천공항 제2터미널 연결철도 공사 현장을 방문할 수 있었다. 현재 인천공항은 주로 쓰이는 제1터미널과 더불어 탑승동 A로 구성되어 있다. 제2터미널은 공사가 진행 중인데 이용 편의성을 위해 현재 1터미널까지 운행되는 공항철도 및 KTX를 제2터미널로 연결하는 것이 그 목적이라고 할 수 있다. 이 공사에서는 공항 및 활주로가 보안상으로도 매우 중요한 지역임이 고려되었고,

열차가 운행될 수 있는 충분한 곡률을 얻어내야 할 뿐만 아니라 가장 최단거리의 터널 건설을 통해 공사비를 절약하는 것이 중점사항이었다. 시공 방법으로는 개착공법, 비개착공법, 실드 TBM 공법 등 구간 별로 여러 공법들이 사용되었으나 해외학술탐방의 주제와 맞는 실드 TBM에 대해 중점적으로 알아볼 것이다.

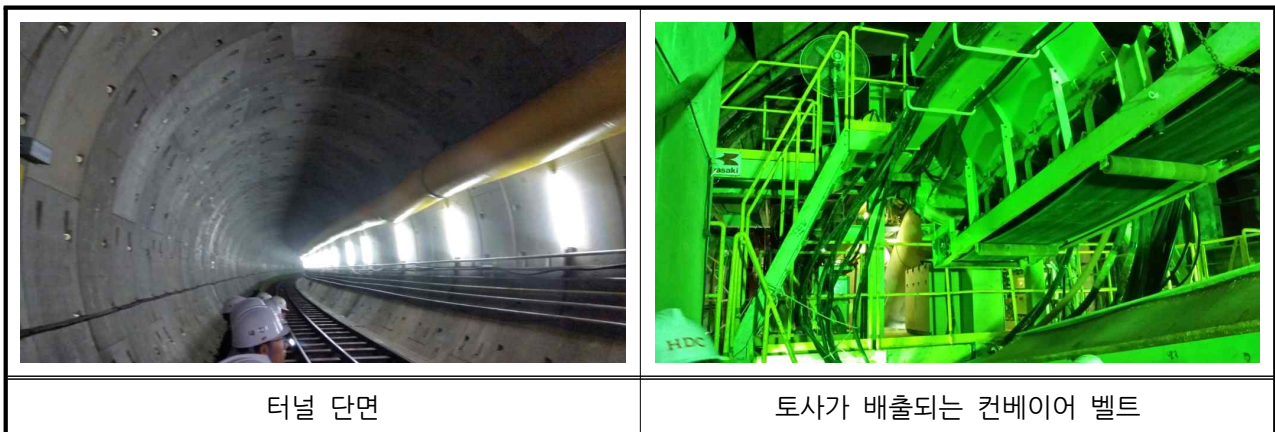
**- 탐방 결과**

1) 인천공항 공사의 의의

앞에서 언급된 대로 이 현장에서는 한 가지 방법으로 시공되는 것이 아닌, 실드 TBM 방법 뿐만 아니라 비개착 공법, 개착공법 등으로 시공되었다. 공항 밑에 터널을 뚫는 것은 세계적으로도 특수한 사례라고 한다. 하지만 그 중에서도 현재 진행되는 공사는 국제공항에서 이루어질 뿐만 아니라 비행기가 상시 운행되는 활주로에서 진행되어 그 난이도가 매우 높은 편에 속한다고 한다. 영국의 히드로 공항의 경우에는 활주로에서 좀 벗어난 지역에 터널이 건설되었고, 일본의 나리타 공항 또한 유도로 부분에 터널이 건설되어 공사 난이도가 떨어진다고 한다. 그리고 대만의 공항은 인천과 달리 지방 공항으로 이용성 및 중요도 부분에서 인천보다 떨어진다고 볼 수 있다. 뿐만 아니라 일본의 경우에는 활주로 침하 범위를 약 87mm로 잡았지만 현대산업개발에서는 침하범위를 16mm로 설계하고 공사를 진행하여 더욱 안전성을 높였다고 볼 수 있다.

2) 실드 TBM 공법 프로세스

일전에 터키 유라시아 터널을 통해 TBM 공법으로 건설되고 있는 현장을 방문하였다. 유라시아 터널은 TBM의 직경이 약 15m에 가까워 인천공항 현장의 약 2배정도였다. 뿐만 아니라 유라시아 터널은 해저에 건설되고 지진에 대한 대비가 이루어져야하는 만큼 세그먼트의 두께가 60cm로 인천 현장의 30cm의 약 2배가 되었다. 실드 TBM 장비의 경우에는 일본의 가와사키사의 장비를 채택하였다. 터키 유라시아 터널의 경우에는 A.S.T. Bochum 사의 TBM 장비가 사용되었다고 한다.



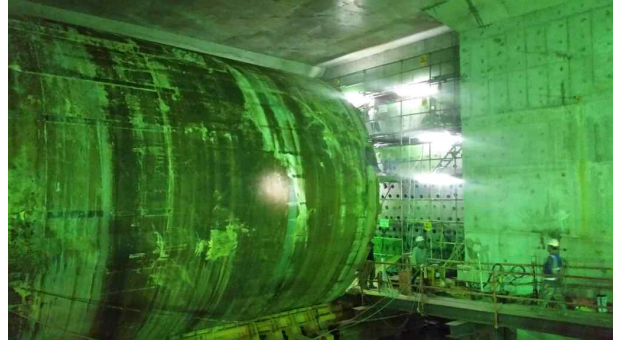
세그먼트는 현장 근처의 공장에 미리 제조되어(PC) 필요한 양 만큼 앞의 기차를 통해 현장에 투입된다. 앞에서 언급한 대로 세그먼트의 두께는 30cm이다. 세그먼트 안에는 물이 들어갈 경우 팽창되는 팽창재를 투입하여 물의 유입을 막는다. 세그먼트의 배치는 굴착해 나갈 때마다 다르게 배치하고, 사다리꼴 형태의 세그먼트도 배치하여 안전성을 높였다. 그리고 세그먼트를 설치할 때마다 볼트를 주입하여 세그먼트를 고정시켰다.

실드 TBM의 관건은 토사의 적절한 배출뿐만 아니라 세그먼트를 압축시키는 힘을 추진력으로 이용하는 실드 TBM의 특성상 세그먼트가 견딜 수 있는 적절한 힘을 줄 수 있느냐는 것이다. 최대 출력은 60,000kN이지만 평균적으로는 30,000kN(1,000kN/EA)으로 운영하고 있다. 이때 1,000kN은 Jack 하나 당 받는 압력이다. 그리고 세그먼트는 설계기준강도가 45MPa로 고강도 콘크리트로 볼 수 있다.

실드 TBM은 한 대가 이용되었는데 한 단면을 뚫고 그 끝 부분에서 시작하여 다른 단면을 뚫는 방식으로 진행되었다.



TBM의 중간 지점, 향후 집수정 및 환기구로 활용



장비의 전진을 위해 앞에 지하수 차단용 목적으로 설치했던 구조물을 제거. 매우 위험한 작업이라고 한다.



지하수의 영향으로 녹이 많이 쓴 커터헤드



터널의 모습. 오른쪽 부분에서 TBM이 다시 뚫고 나오게 된다.



향후 연결통로로 건설될 예정으로 현재는 콘크리트가 아닌 철골 구조물로 시공

일반적으로 터널은 지진에 안전한 구조물이다. 계산을 하게 되면 터널의 단위중량은 일반 흙의 20% 수준이다. 계산 방법은 터널의 콘크리트 무게에서 전체 체적(벽 포함)을 나눠주면 된다. 그래서 중량이 작으므로 지반이 흔들리더라도 그 움직임에 편승하게 되어 터널이 외부에서 받는 힘은 적어진다.





실드 터널 구간에서는 환기구 #2, #3에서 대피 및 환기가 이루어진다.

### 3) 총평

해외학술탐방에서 실드 TBM에 관한 것들을 많이 보고 배우고 왔는데 국내에서 시공 중인 실드 TBM 현장을 견학했다는 것에 큰 의미가 있다고 생각한다. 최근에는 기계화된 TBM 공법을 많이 사용하는데 각 현장마다 지반 상태는 다른 만큼 최대한 많은 현장을 보는 것이 더 유익하다고 생각했는데 이번 견학을 통해 그러한 부분들을 보고 배울 수 있었다. 터널 공사는 높은 기술력 없이는 매우 위험한 공사이다. 따라서 흙과 지하수의 유입을 막으면서 효율적으로 공사를 진행할 수 있는 방법에 대해서는 더 많은 고민들이 필요하다고 생각한다. 현대산업개발에서 전체적인 노선을 결정한 부분이나 시공하고 있는 과정들을 보면서 공항 운영에 지장을 주지 않으면서 열차의 주행을 가능하게 하기 위한 고민의 흔적들이 많이 보였던 것 같다. 특히 활주로 침하 범위를 16mm로 잡아서 향후 완공되고 유지 관리가 성공적으로 이루어진다면 세계 토목에서도 거의 최초의 사례가 되어 우리나라 시공 기술 수준을 높일 수 있는 계기가 될 것이라고 생각한다.

### 결론

본 탐방단은 기술과 소통의 결합이라는 테마를 가지고 이번 해외 학술 탐방을 진행하였다. 해저터널의 현장이나 기념관 등을 직접 방문해봄으로써 한국형 해저터널의 모델은 어떤 방향으로 구성되어야 하는 것인가 뿐만 아니라 향후 세계 해저터널 시장에서 우리나라가 경쟁력을 갖추고 대륙과 대륙을 잇는 '새로운 판게아'를 이뤄낼 수 있을 것인가에 대한 해답을 얻는 것이 이번 해외 학술 탐방의 목표였다.

먼저 기술적인 측면에서는 일본의 세이칸 터널, 동경만 아쿠아라인을 통해 재래식으로 시공되었던 초기 모델에서부터 TBM 기계를 활용하고 환기 목적의 인공섬을 건설한 최근의 모습까지 해저터널의 발전 과정을 눈으로 직접 확인할 수 있었다. 아울러 터키의 유라시아 터널 현장을 직접 방문해봄으로써 현재 우리나라의 해저터널 기술력이 독자적으로 해저터널을 건설할 수 있는 수준에 이르렀음을 알 수 있었다. 이러한 기술력을 기반으로 장래 우리나라 토목 산업은 단순한 저가 수주가 아닌 민간 자본과 정부가 결합된 PPP로 수익성을 보장받도록 노력해야 할 것으로 생각된다.



일본의 아쿠아터널 건설 시에 문제가 되었던 부분은 연약지반과 환기문제이다. 전술한 두 가지 문제를 인공섬의 조성을 통해 한꺼번에 해결하였을 뿐만 아니라 이를 관광지로 활용한 일본의 아쿠아터널의 경우를 살펴보았다. 또한 외레순 다리의 경우, 건설 시 문제가 되었던 코펜하겐 공항 운영 문제를 해결하기 위해 만들어진 인공섬이 친환경적인 용도로도 활용되고 있다는 부분 또한 눈여겨 볼만한 부분으로 초장대 해저터널 건설 시 만들어질 인공섬의 다양한 활용방안에 대해서도 고민해볼 수 있었다.

각 터널들의 환기 방법, 그리고 화재나 사고시 대피 방법 뿐만 아니라 케임브리지 대학에서 연구를 진행 중인 서형준 연구원과의 인터뷰를 통해 알 수 있었던 터널 구조적인 유지뿐만 아니라 관리를 효율적으로 실시할 수 있는 광섬유를 활용하는 하는 기술을 통해 초장대 해저터널에 적용할 수 있는 유지, 관리 방법에 대해서도 생각해보게 되었다.

마지막으로 런던의 크로스레일 프로젝트, 터키의 유라시아터널 등을 통해 포화되고 노후화된 도심에서 교통 문제를 해결하는데 해저터널 기술력을 활용할 수 있음을 알게 되었다.

소통과 관련해서는 나라와 나라를 잇는 외레순 다리와 유로터널을 통해 양 국가 간에 어떤 방식으로 finance 구조를 형성하였는지에 대해서도 알아보았다. 또한 덴마크와 스웨덴 두 나라를 잇는 외레순 다리의 건설 과정에서 전술한 공항 운영 문제라는 난관을 극복한 과정에 대해서도 살펴보았다. 아울러 터키 유라시아 터널 후 가진 인터뷰에서 알 수 있었던 초장대 해저터널의 경우에는 글로벌 프로젝트로 타 문화에 대해 유연한 태도를 가지고 그들을 이해하는 것이 필수적임을 알 수 있었다.

귀국 후에는 포니정 재단에서 마련한 하계현장답사에 참여하여 본 탐방단이 해외학술탐방에서 보고 익혔던 쉴드 TBM이 인천공항 제2터미널 연결철도 현장에서 직접 적용되는 현장을 눈으로 볼 수 있었다. 효율적인 시공을 위한 노선 선정에서부터 시공 방법까지 전체적인 프로세스를 볼 수 있었고, 향후 초장대 해저터널 공사 시 다양한 현장 답사를 통해 지질 상태에 따라서 어떤 시공법을 채택해야 하는지 발생할 예기치 못한 사고와 문제점들을 어떻게 해결할 것인지에 대해서도 고민해보게 되었다.

이처럼 기술과 소통의 결합이라는 점과 더불어 건설의 당위성을 확보하기 위한 교통 및 물류 수송의 수요에 대한 예측, 건설 자금 확보를 위한 국가 간 협의, 해저 지질 상태에 따른 시공법, 건설 후의 유지 및 관리 방안, 그리고 마지막으로 해저터널 자체나 기술력을 통한 부가적인 수익창출 위한 다양한 방법에 대한 고찰의 순서로 진행되는 해저터널 건설의 프로세스를 더욱 심도 있게 이해하여 본 탐방단이 추구하였던 목표를 이룰 수 있다고 생각한다.