

# 독일 ELBE터널 지하도로 건설 사례



송 훈

(주)선진엔지니어링 지반터널부 전무  
(사)한국토질및기초기술사회 홍보위원회 위원장

## 1. 서론

대심도 지하도로망 구축사업인 서울시의 U-SMARTWAY 사업이 발표되면서, 도심지의 대심도 지하공간을 활용한 대규모 터널 건설에 대한 관심이 증대되고 있다. 초고밀도화된 대도시의 천층 및 중층 지하공간 이외에 대심도의 지하공간을 활용함으로써 도심지 토지이용공간의 고밀도화, 용지보상 및 민원해결가능, 도시환경보존 과 미관의 가치 향상 등을 도모할 수 있다.

해외 선진국에서는 도시의 발달과 인구의 집중화로 제한된 지상용지의 부족에 따라 에너지 절감, 재해예방, 교통체중 해소, 지상 녹지공간을 확보하기 위하여 스페인 마드리드의 M30도로는 이미 준공되어 공용중에 있고 프랑스 파리의 A86, 일본 동경 중앙환상선 지하도로 등 도심지 지하도로건설이 활발히 진행되고 있다. 도심지의 대규모 터널에 의한 지하도로는 기존 도로 및 건물 하부에 건설되기 때문에 기존 구조물과의 안전성 확보가 중요한

사항이며 공사기간, 공사비용 및 공사 중 교통흐름 저해를 최소화하고 신속한 개통으로 사업 효과를 조기에 극대화하기 위해서는 터널의 급속시공을 도모할 필요가 있다. 이러한 측면에서 우리나라의 U-SMARTWAY 사업의 벤치마킹 대상이 되고 있는 해외의 도심지 지하도로 프로젝트들에서는 쉴드 TBM을 필수적으로 적용하고 있는 상황이다. 따라서 본 고에서는 쉴드 TBM으로 건설된 독일의 ELBE 터널 지하도로 프로젝트 사례를 소개하고자 한다.

## 2. 엘베(ELBE)터널 개요

엘베강이 통과하는 함부르크는 독일 최대의 항구도시이자 북유럽 교통의 요지이다. 산업발전과 교통수요 증가에 따라 20세기 초반부터 엘베강을 횡단하여 함부르크 남북을 연결하는 하저터널 건설이 꾸준히 추진되어 왔으며 현재 Old 엘베터널과 New 엘베터널이 건설되어 운용되

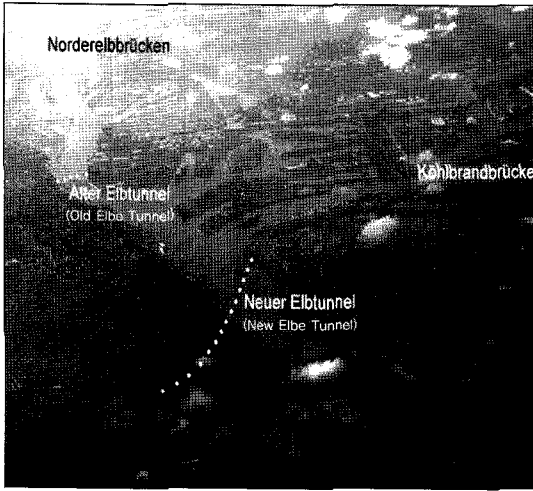


그림 1. 엘베터널 위치도

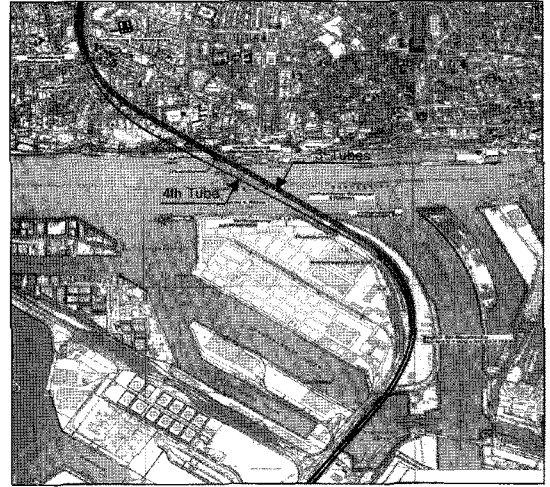


그림 2. New 엘베터널 평면도

표 1. 엘베터널의 개요

구분	Old 엘베터널	New 엘베터널	
		3-Tubes	4th Tube
사업기간	1907~1911	1968~1975	1995~2004
연장	426,5m	2,653m	4,400m
설드규모	직경 : 7.0m, 길이 : 9.0m	직경 : 11.09m, 길이 : 9.0m	직경 : 14.2m, 길이 : 12.9m
굴진율	1.50m/일	- m/일	2.95m/일 (살굴진율)
굴착공법	<ul style="list-style-type: none"> <li>Shield 공법(재래식 터널굴착)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>콘크리트 블록연결</li> <li>TBM 공법(굴삭기에 의한 재래식 터널 굴착)</li> <li>개착공법</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Shield TBM 공법</li> </ul>
특징	· 재래식 터널 굴착	· 구간별 3가지의 굴착공법적용	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 3-Tube와 50m 이격 하여 병렬로 추가 건설</li> <li>· 터널하부에 제연덕트 설치</li> </ul>

고 있다.

이중에서 Shield TBM 공법으로 최근에 건설된 4th Tube(이하 엘베터널)에 대해 간단히 소개하고자 한다.

### 3. 엘베강의 지반조건

엘베터널이 건설된 함부르크의 엘베강은 바다에 접하는 강 하류지역으로 조수 간만의 차에 의한 수위 및 하저

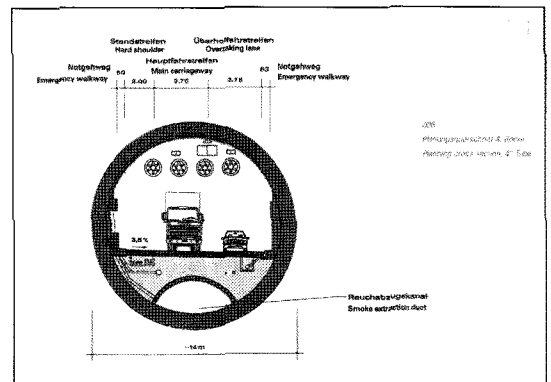


그림 3. 4th Tube 엘베터널 단면도

기술기사 3

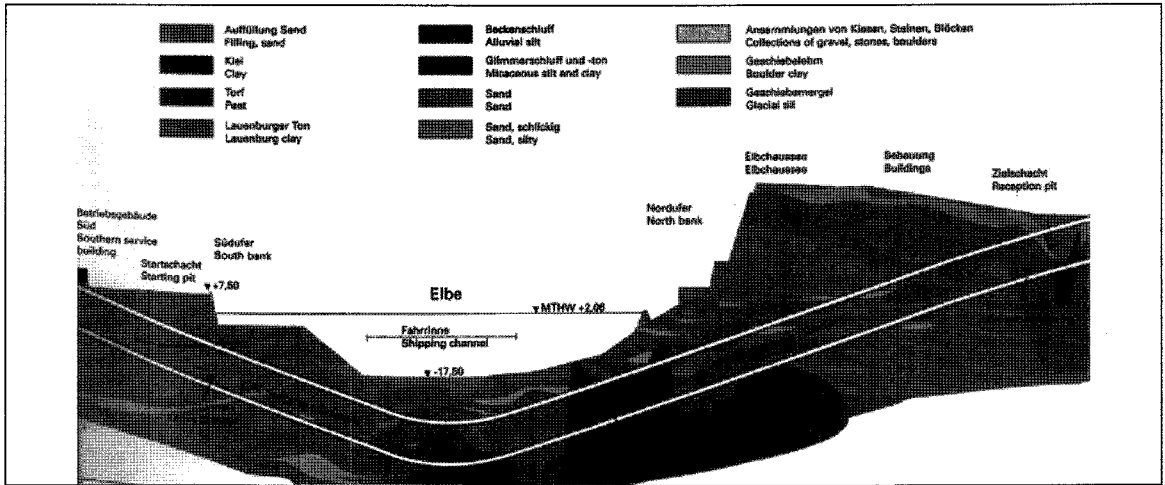


그림 4. 엘베터널 구간의 지반조건

의 수심 변화가 심한 지역이며 엘베강 하저구간의 지반조건은 매우 복잡한 불균질한 구성을 이루고 있다. 엘베강 남쪽 제방구간은 자갈과 호박돌이 밀집된 지층위에 완신세(Holocene) 유기질 모래 및 실트층과 홍적세(Pleistocene) 모래층 등으로 구성되어 있다. 엘베 중간지역부터 북쪽 제방구간까지 모래층, 빙적토(glacial till)층, 라우엔부르크(Lauenburg) 점토층 등이 다양하게 존재하고 특히 운모성 실트 및 점토층이 넓은 범위에 걸쳐 분포하고 있다.

이와같이 엘베강 하저구간의 불균질한 지반특성으로 터널 굴착의 안전성 확보를 위한 충분한 지반조사와 계속 관리가 요구되었으며, 3-Tube 건설시 조사된 지반정보에 추가하여 엘베 전 구간에 걸쳐 다수의 시추조사가 수행되었고 상시 간극수압 모니터링을 통해 조수의 변화에 따른 작업장 압력의 변화를 관측하였다.

4. 엘베터널 건설을 위한 사전 준비 절차

1) 엘베터널 건설을 위한 최적의 건설공법과 자금조달

방안 수립을 위해 터널 건설 경험이 풍부한 세계 11개 업체로부터 제안서를 공모, 검토하였으며, 그 전반적인 절차는 아래와 같다.

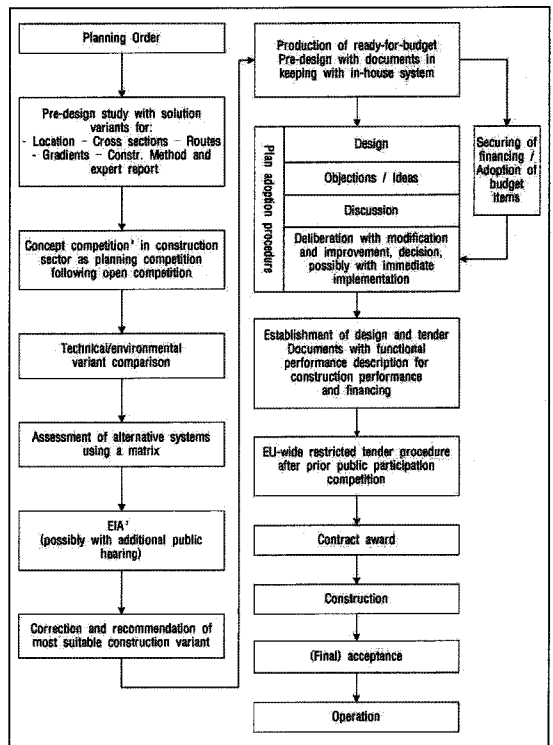


그림 5. 엘베터널 사업추진절차

2) 계획 및 시공 리스크 분석

모든 사업 단계에서 발생하는 리스크의 경중을 파악, 대처하기 위해 3개로 구분하여 리스크 분석을 실시하였다. 사업 초기단계에서 발생하는 리스크는 사업 전체에 파급되는 영향이 크기 때문에 그 비용이 상대적으로 크게 고려되었음을 알 수 있다.

- ① 사전계획 및 경제성 검토 : 1단계 & 2단계
- ② 경영 및 법적타당성 검토 : 3단계 & 4단계
- ③ 사업시행 : 5단계

3) 엘베터널 계획의 사회적 합의노력

엘베터널 계획이 발표되었을 때 시민사회단체를 비롯하여 거의 모든 사회 주체들이 환경적 재앙과 사유재산 침해를 우려하며 거세게 반대하였다. 사업시행자측은 우려와 반대의견에 대한 기술적 검토와 대책마련을 성실히 수행하며 불안을 해소하고 신뢰를

구축하는데 힘썼다. 환경오염방지와 사유재산 피해 최소화를 위하여 고려한 사항은 다음과 같다.

- ① 터널이 통과하는 사유지 구간에서 토지등기 소유자를 명확히 함
- ② 사전예방적 경관보존대책  
예) 나무 보호, 배상, 복구 등
- ③ 지하수위 저하 방지
- ④ 방음벽 설치 : 시공단계 및 운영 중
- ⑤ 중장비 시공장비의 도로사용을 위한 특별 규정
- ⑥ 사고 발생시 증거자료로 제출 할 수 있도록 터널 주위 50m 이내의 기존 건물의 기록
- ⑦ 터널 주변 건물 하부에 대한 지반개량
- ⑧ 진동, 소음, 지반 변형 피해저감을 위한 TBM 굴진속도 및 버력반열차 운행속도 저감
- ⑩ Monitoring programme : 막장면 안전성 확보를 위한 support pressure, 그라우팅 유입량, 변형, 침하계측 등
- ⑪ 터널 내부 및 출구부의 오염도를 모니터링하기 위한 측정소 설치
- ⑫ 건축물 하부 터널 굴진 기간 동안 거주숙박시설 무료제공
- ⑬ 터널 공사중 현장견학 시찰 제공
- ⑭ 터널공사 진척상황에 관한 팸플릿론, 공개토론에 학생, 선생님을 포함한 수많은 인근주민 참여

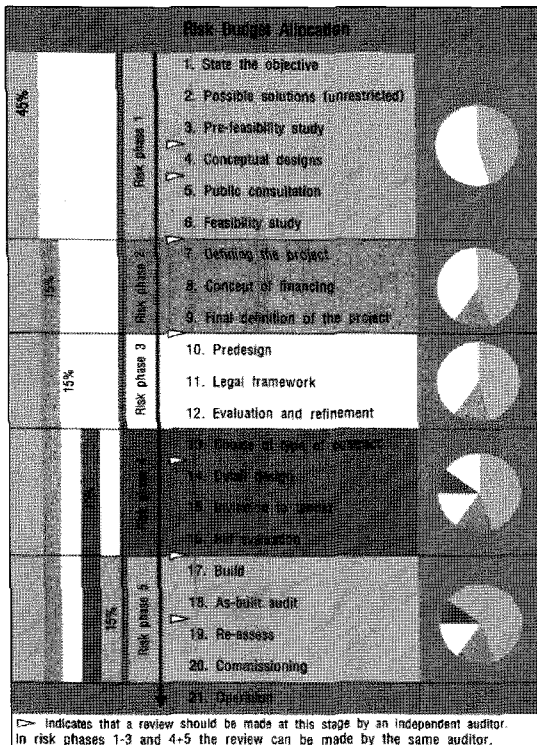


그림 6. 사업 단계별 리스크 배분비율

5. 실드 TBM의 주요 사양

엘베터널 굴착은 당시로서는 세계 최대규모의 TBM(외경 14.2m)이 적용되었고, TBM에 의한 총 굴착연장은 2,650m로 28.5개월의 기간이 소요되었다. 터널건설에 사용된 TBM의 주요 사양은 다음과 같다.

기술기사 3

항 목	사 양
설드타입	이수식 설드 TBM (Slurry Shield TBM)
설드외경	14.2 m
설드길이	12.9 m
총중량	2,000 ton
설계굴진율	6.0m/day
실제굴진율	2.95m/day

사유: 작업장 붕괴, 압축공기압 및 벤토나이트 수위 감소 등 각종 사고발생으로 굴진율 저하

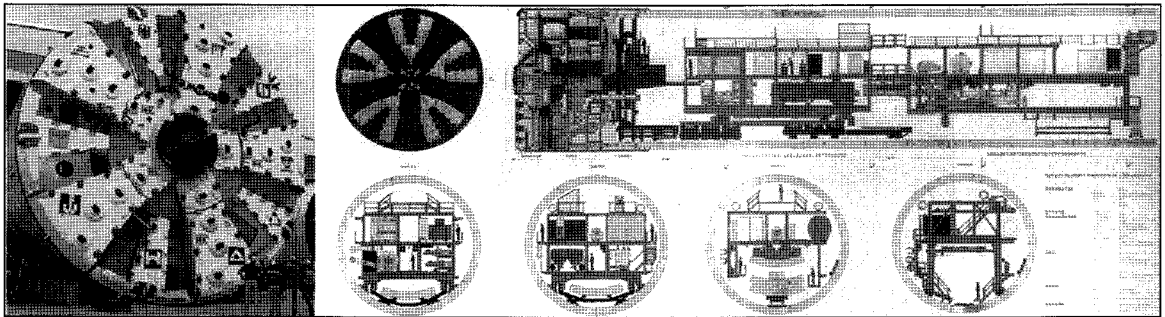
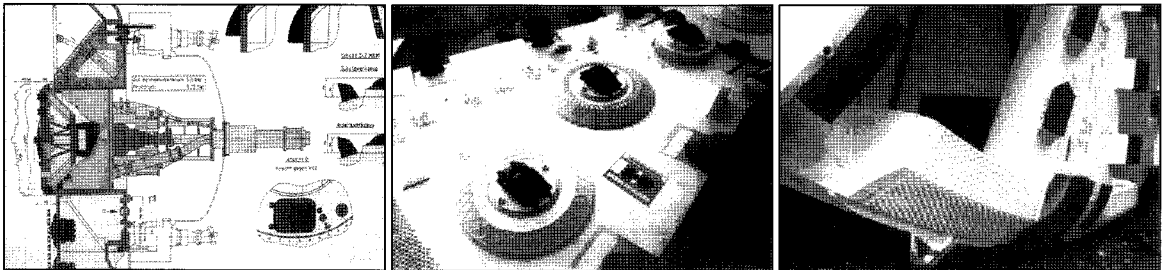


그림 7. 엘베터널에 사용된 설드 TBM



Center Cutter

Double-disc Cutter and Picks

Gauge Cutter

그림 8. Center Cutter and Tool Cutters

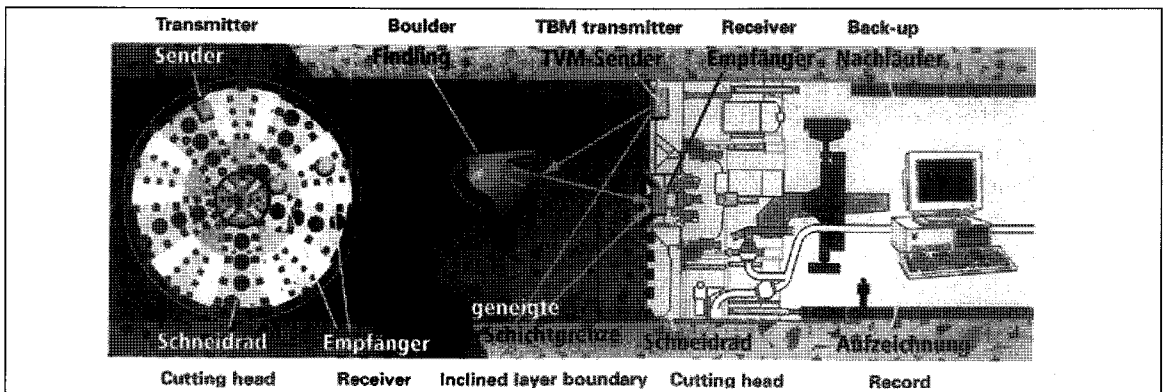


그림 9. 전방 탐사 원리(SSPS 202)

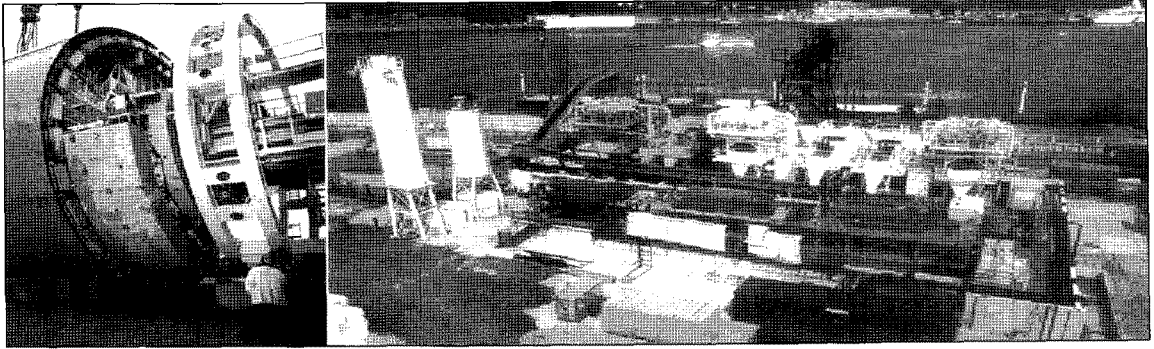


그림 10. Erector and ring former & Slurry Separation System

1) 엘베터널에 적용된 TBM의 세부내용

① Cutter Section

- ▷ 시계 방향 혹은 시계 반대방향 모두 회전
- ▷ 2단계 속도 조절
  - 1단계 : 0~1.75rpm, 토크 26MN
  - 2단계 : 0~2.50rpm, 토크 18MN
- ▷ 조타 장치: ELS(Electronic Laser System)
  - 경사계 : 굴진방향 및 위치 결정
  - 스마트 센서 시스템 : 레이저 빔을 이용한 정밀한 굴진각 조정
- ▷ 중앙 커터 설치(Center Cutter) : 버력에 의한 막힘 방지
  - 직경 3.0m, 세로 이동거리 600mm
- ▷ 25개 이중 디스크 커터, 20개 게이지 커터, 89개 픽스
- ▷ 3 man locks(2× $\Phi$ 2.0m+1× $\Phi$ 1.64m), 2 material locks( $\Phi$ 0.8m)
  - 수리 및 슬러리 처리를 위한 통로
- ▷ 버력 분석기(Stone Crusher)
  - 압축력 900KN, 최대 분쇄직경 1.20m
- ▷ 전방 탐사(Forward Probe)
  - 지반 음파탐지 시스템(SSPS 202)
  - 지질구조 및 장애물 탐지(탐사 가능거리 : 50m)

② Middle Section

- ▷ 32쌍(64개)의 추력 램
- ▷ 램 피스톤 직경 : 280mm(봉 직경 240mm)
- ▷ 램 작동거리 : 2,800mm
- ▷ 램 압축력 : 1,875KN(305bar)
- ▷ 총 추진력 : 일반 작동시 120,000KN, 최대 설계용량 160,000KN
- ▷ 전진속도 : 50mm/min  
(후진속도 : 50mm/sec)

③ Tail Section

- ▷ Segment erector
- ▷ Ring former
- ▷ Grouting ducts
- ▷ Shield tail seals

④ Back-up Trailers

- ▷ 길이 20m, 중량 300ton

2) TBM 굴착을 위한 시험

- ① 전방 탐사(Forward Probe)에 의한 지반 성분 분석(음향 반사를 이용한 측정)
  - ▷ Hardware
    - 2개의 음향 발신기(Acoustic transmitter)
    - 2개의 가속기(Accelerator)와 3개의 수신기(Receiver)

기술기사 3

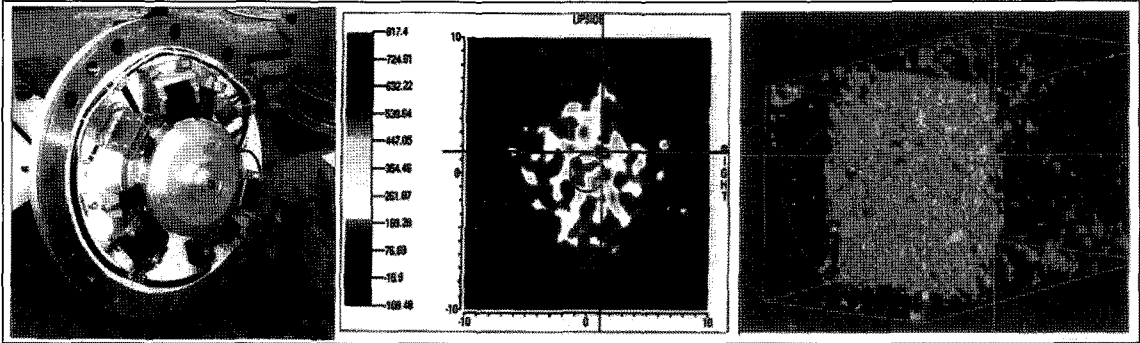


그림 11. Acoustic transmitter & Gravel lenses (20m 전방) & Grouting block (8m 전방)

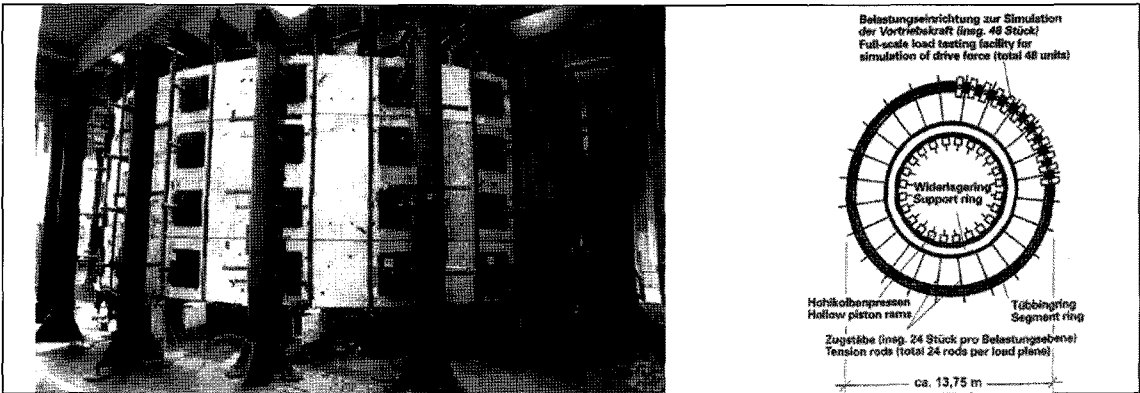


그림 12. 세그먼트 Full Scale Test

▷ Software

- 지진 측정 자료의 획득, 처리 및 화면표시 가능

② 세그먼트 시험

▷ 소규모 시험(Small scale test)

- 보강용 콘크리트 및 철근량 확인
- 전단력 시험, 비틀림 강도시험, 하중전달 시험 등
- 세그먼트 연결부 추가 보강여부 결정

▷ 대규모 시험(Large scale test)

- 여러 심도에서 터널 라이닝의 하중지지 거동 파악
- 한계 변형 범위의 결정
- 안전을 선정에 필요한 정보 제공
- 구조 계산과 함께 외력과 변형요소에 대한 비

교 수행

- 보강 범위의 최적화 결정

6. 하저구간 터널상부 지반 개량

엘베터널이 통과하는 엘베강 지역은 북해에 인접한 지역으로 조수 간만의 차에 의한 수심의 변화(1~5m)도 발생하고, 지반조건이 불량(느슨한 모래 퇴적층)으로 터널 안전성 확보를 위해 터널상부 지반 개량의 필요성이 대두되었다. 이에 지반개량을 목적으로 진동다짐공법(Vibro-compaction)과 하중재하공법(Blanket of copper slag stone)이 적용되었다.

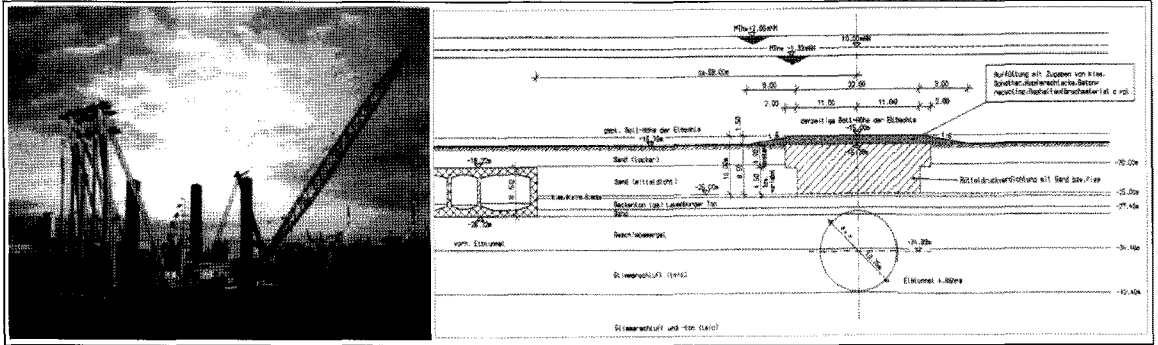


그림 13. 진동다짐설비와 하중재하공법 단면도

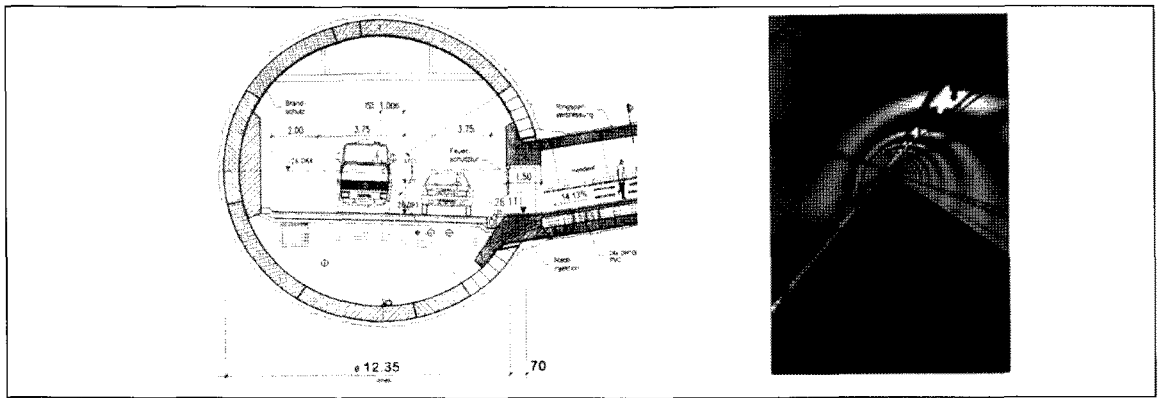


그림 14. 횡단터널 단면

진동다짐공법은 터널 토피층의 지반조건을 개선(밀도 증가)하기 위해 엘베강을 통과하는 노선 및 폭 25m에 걸쳐 시행되었으며 진동주기 60Hz, 평균 타격강도 15MN/m<sup>2</sup>의 강도가 적용되었다

하중재하공법은 터널 시공시 지반유실 및 토피층 용기를 방지하기 위해 재하층 두께 1.5m, 단위중량 2.2ton/m<sup>2</sup>의 무게로 실시되었다.

## 7. 터널 안전 개념의 적용

엘베터널은 터널내 사고에 대비하고 사고시 이용자의 안전과 대피를 고려하기 위한 터널 단면 및 시설 계획, 방

재 및 운영계획 등은 다음과 같다.

### ① 터널단면 계획

- ▷ 길어깨 차로 (hard shoulder, 폭 2.0m) 설치
  - 운전자에게 심리적 안정감을 주어 사고 발생률 감소
  - 사고발생시 진입차량 진입로 및 이용자 탈출통로 제공

### ② 시설계획

- ▷ 횡단터널 계획 (외경 4.42m)
  - 중대형 차량 교통량에 의한 터널 내 사고 위험성 증대에 대처
  - 터널 북측, 센터, 남측에 각각 1,000m 간격으



# 기술기사 3

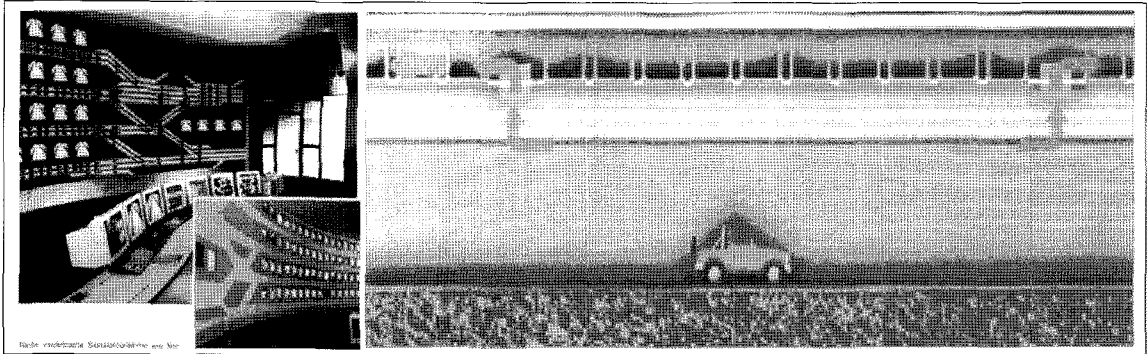


그림 15. 터널운영센터 내부 및 연기 배출 개념도

- 로 3개의 횡단터널 계획
- 길어깨 차로 및 연기배출 덕트 설치로 효율성 극대화
- ③ 방재 및 운영계획
  - ▷ 화재 진압팀 상시 배치(터널 양쪽 입구)
  - ▷ 화재감지 시스템
    - 화재 감지 케이블 (터널 천정부 중앙 8m 간격으로 설치)
    - 비디오 카메라 (60m 간격으로 설치)
    - 열반응 퓨즈(Temperature-melting fuse, 연기 배출창에 각각 설치됨)
  - ▷ 연기배출 덕트
    - 터널 입구에 설치된 이중 팬 송풍기 작동에 의
- 해 연기 배출
  - 화재 발생시 60m 구간에 있는 연기 배출창이 열려 연기 흡입
  - ▷ 비상호출 베이 설치(소화기, 소화전, 비상전화기 등)
  - ▷ 화재 비상등
    - 운전자 탈출 유도
    - 150W 할로겐 램프, 20m 간격 설치
  - ▷ 별도의 비상전원 공급장치(2곳)
  - ▷ 화재로부터 터널 구조물 보호
    - 터널 천정 부분 및 연기배출 덕트에 패널 부착
    - 이중 패널 구조(각 패널 두께 25mm)
    - 유리섬유가 첨가된 고품질 경량 콘크리트

표 2. 프로젝트별 적용된 TBM 현황

구분	ELBE 터널	M-30 터널	A-86 터널
종류	Mix Shield(SFM)	EPB	Mix Shield
직경	14.2m	15.2m	11.6m
중량(TBM+Back-up)	2,600tons	4,000tons/4,115tons	2,400tons
최대 굴진압	5.5bars	6.0bars/6.0bars	6.0bars
최대 추진력	160,000kN	317,000kN/315,880kN	148,280kN
커팅헤드 파워	3,200kW	9,800kW/12,000kW	4,000kW
최대 토크	26,000kNm	125,000kNm/125,268kNm	16,360kNm
회전속도	0~2.5rpm	0.1~2.43rpm/ -	0~2.4rpm
굴삭 장치	디스크(25), 게이저(20), 픽스(89)	디스크(44), 트럼비트(32), 드래그(472), 예지비트(226)	-
굴진율	2.95m/day	13.3~16.7m/day	30m/day

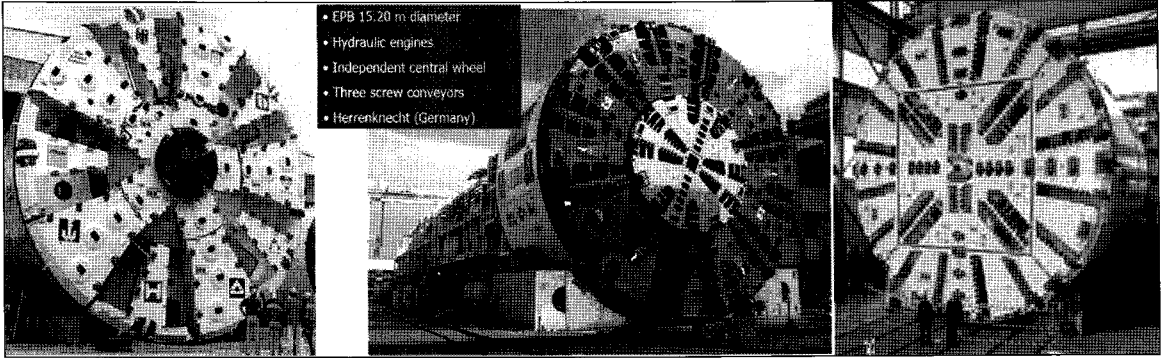


그림 16. TBM 장비 (왼쪽부터 ELBE 터널, M-30 터널, A-86 터널)

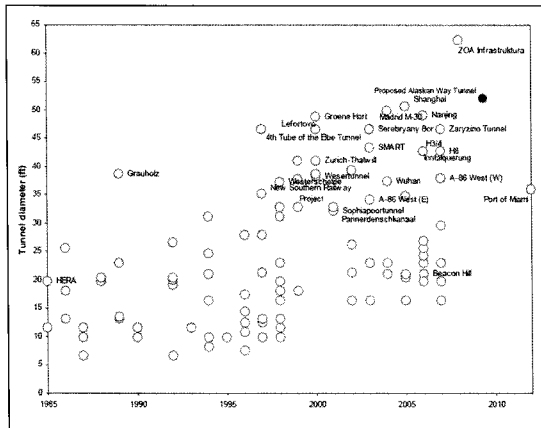


그림 17. 연도별 TBM 직경 적용 현황

- ▷ 터널운영센터 : 교통통제(VR3) 및 터널 운영의 중추적 역할
  - 터널 전 구간에 대한 상시 TV 모니터링
  - 라디오 교통방송 채널 확보

## 8. 주요 지하터널 TBM 공법 비교

지하도로 터널 건설의 주요 해외사례 중 ELBE 터널, M-30 터널, A-86 터널은 기계식 굴착공법(셸드 TBM)에 의한 대표적 시공사례로 알려져 있다. 이 프로젝트에

적용된 TBM의 특징은 다음과 같다.

## 9. 결론

현재 세계적으로 서울과 같은 대도시에서는 도로교통 문제로 인한 막대한 교통혼잡비용(서울: 7조/년 이상)이 매년 증가하고 있어 대도시의 경쟁력을 격감시키고 있고 1m<sup>2</sup>에 1,000만원 이상(서울)되는 도시지역의 용지비, 민원문제 및 환경문제 등은 이러한 교통문제를 해결하는데 장애가 되고 있다. 이러한 도시교통문제를 해결하기 위해서 선진외국에서는 지하도로가 도시교통문제 해결의 대안으로 확대되어 가고 있으며 우리나라에서도 서울의 U-Smartway 등 대심도 지하도로건설이 현실화 되어가고 있다. 하지만 우리나라의 경우에는 대단면 TBM에 대한 경험이 부족하고 방재문제 등 지하 대심도 도로터널에 대한 시민, 여론의 불안감 등 아직도 해결해야 할 문제가 많다고 할 수 있다.

국내 대도시의 교통문제, 환경문제 해결을 위한 대심도 지하도로를 성공적으로 건설·운영되도록 하기 위해서는 대심도 지하도로 사용자인 시민들의 불안감을 해소시키고 경제성, 안전성, 사용자 편의성 제고, 공사단계 및 운

## 기술기사 3

영중에 시행착오 최소화가 본 사업의 당면과제라 할 수 있다. 이를 위하여 고속철도, 원자력발전의 국내도입 당시와 같이 해외 유사프로젝트에서의 경험이 접목될 수 있도록 사업 초기에는 대심도 지하도로 관련 해외선진기술의 참여 장려책이 필요하다고 판단되며 이를 통하여 대단면 TBM 기술의 개발, 지하개발 관련법규의 정비, 방재기

술 등 대심도 지하도로 전반에 관한 세계적 기술경쟁력 확보기회로 삼아야 할 것이다. 또한, 국내에서의 대심도 지하도로 건설 경험을 바탕으로 해외건설시장(대심도지하도로)에서 한국업체들이 세계건설시장을 선점할 수 있도록 정부, 기업, 학계 및 사회전반의 공조가 필요한 시점이라고 할 수 있다.

**[참고문헌]**

1. masthead Publication and PR, Hamburg, "THE 4th TUBE OF THE ELBE TUNNEL IN HAMBURG"
2. Cofiroute 2003 Annual Report
3. Federal Highway Administration (FHWA) (2009) "Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels-Civil Elements" FHWA-NHI-09-010, Washington D.C.