

[표 3] TBM 공법의 명칭

| 국가 | 명칭 | 비고 |
|----|-----------------------------------------------------|--------------------|
| 한국 | TBM / TBM 장비 (Open TBM, Shield TBM) | 굴착 장비 |
| | 셴드 공법 -> TBM 공법 / 셴드 TBM 공법 | TBM 터널 |
| 일본 | 셴드 (シールド) / 셴드 추진기 | 셴드 머신 |
| | TBM 공법 - 경암 / 산악 터널공법 | 산악 터널 (산악부) |
| 해외 | 셴드 공법 (シールド工法) - 토사 / 도심지 터널 공법 | 셴드 터널 (도심지) |
| | Shield / Shield Machine | Shield Machine |
| | TBM (Tunnel Boring Machine) | Tunnelling Machine |
| | TBM tunnelling / Mechanized tunnelling / TBM Method | TBM tunnel |

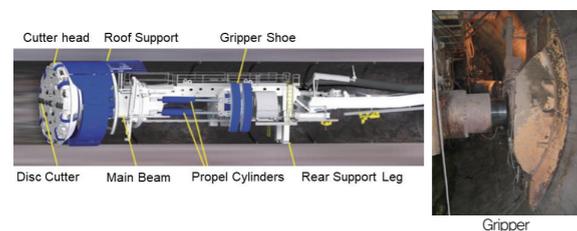
1. 오픈 TBM VS. 셴드 TBM

TBM 공법은 TBM 장비의 굴진을 위한 반력을 그리퍼 (Gripper)의 암반벽면 지지에 의해 얻는 Open TBM (Gripper TBM)과 세그먼트에 대한 반력을 이용하는 셴드 TBM으로 구분된다. 이전에는 암반 굴착에는 Open TBM 그리고 토사지반 굴착에는 셴드 TBM이 사용되는 것으로 인식되어왔으나, 현재는 오픈 TBM과 셴드 TBM을 복합한 TBM이 개발되어 사용되고 있다.

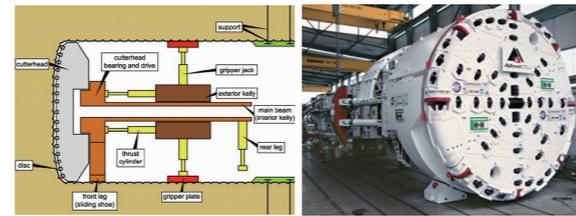
1.1 오픈 TBM (그리퍼 TBM)

암반을 굴착할 수 있는 Open TBM은 터널 주면을 지지하고 내부 작업공간을 보호하기 위한 셴드가 없으며, 굴착 벽면에 대한 그리퍼의 지지력으로 추진력을 얻는다. 또한 굴착 후 터널 안정성을 확보하기 위해 셴드 TBM에 적용되는 세그먼트 라이닝(segment lining)이 아닌 슛크리트, 록볼트 등과 같은 지보와 콘크리트 라이닝이 활용되는 굴착장비이다.

[그림 3] 오픈 그리퍼 TBM 구성



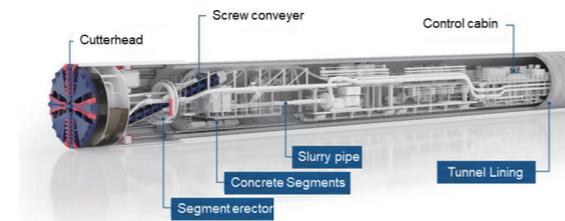
[그림 4] 오픈 그리퍼 TBM의 작동 원리 및 모습



1.2 셴드 TBM

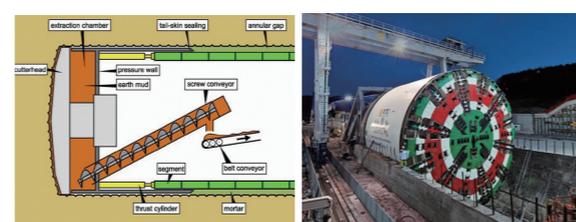
셴드 TBM은 커터 헤드 회전 및 추진에 의해 지반을 굴착하는 것은 Open TBM과 동일하나, 주변 지지를 위한 셴드가 포함되어 있으며 굴진단계에서는 추력 실린더를 이미 시공된 세그먼트 라이닝에 지지해 반력을 얻음으로 인해 셴드를 전진하는 굴착장비이다. 또한 셴드 TBM은 경우에 따라 암반, 토사지반 및 복합지반을 굴착할 수 있으며 막장면(face)의 안정성을 확보하기 위해 토압식(EPB), 이수식(Slurry), 혼합식(Hybrid or Multi) 등의 시스템을 채용할 수 있다.

[그림 5] 셴드 TBM 구성



셴드 TBM 공법은 셴지기 전면에 장착된 커터 헤드를 회전시키면서 디스크 커터(면판)가 지반을 굴착한다. 이후 이수 (Slurry) 또는 굴착된 버력으로 챔버를 채워 막장압을 유지한다. 이렇게 압력을 가하면서 회전·전진하며 터널을 굴진하면 분쇄된 암석과 흙은 컨베이어 벨트 또는 배관을 통해 TBM 장비 뒤로 옮겨지고 굴착과 동시에 이렉터를 이용해 터널 벽면에 세그먼트 라이닝(Segment lining)을 설치하여 하나의 링 구조(ring structure)를 완성하게 된다.

[그림 6] 셴드 TBM의 작동 원리 및 모습



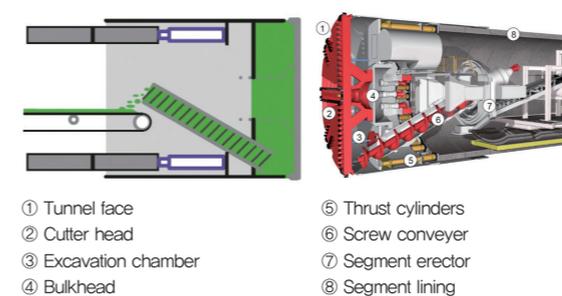
2. EPB 셴드 VS. Slurry 셴드

셴드 TBM은 터널 굴진 후 챔버 내에 압력을 가하는 방식에 따라 이수식(Slurry Pressure Balanced, SPB)과 토압식(Earth Pressure Balanced, EPB)으로 나뉜다. 막장압을 챔버 내에 채워진 굴착토로 메워서 지지하면 토압식(이토압식), 물을 섞은 점토인 이수(Slurry)로 채워서 압력을 가하면 이수식(이수가압식)이라고 한다.

2.1 EPB 셴드(토압식 셴드)

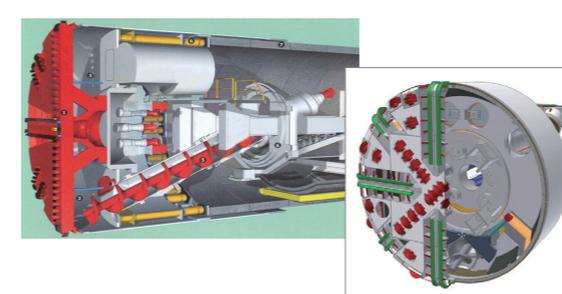
EPB 셴드 TBM은 전단면 굴착을 위한 커터 헤드(cutterhead)를 장착하고 챔버안에 굴착된 물질을 압축함으로써 막장면을 지지하면서 스크류 컨베이어로 배출한다. 일반적으로 막장면 토압이 확실하게 스크류 컨베이어에 전달되도록 소성 유동화한 굴착토를 챔버에 가득 채우게 된다.

[그림 7] EPB 셴드 TBM의 구성



EPB 셴드 공법은 커터 헤드로 굴착한 토사를 막장과 격벽 사이에 충전시키고, 필요에 따라 첨가제를 투입, 그 토압으로 막장의 안정을 도모하면서 굴진, 격벽을 관통하여 설치한 스크류 컨베이어로 배토하는 공법이다.

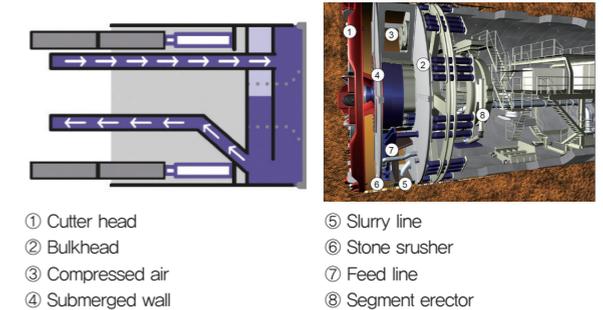
[그림 8] EPB 셴드 TBM의 모습



2.2 Slurry 셴드(이수식 셴드)

Slurry 셴드 TBM은 커터 헤드로 전단면굴착을 수행한다. 챔버내에 이수를 가압순환시켜 막장을 안정시키며 버력처리 역시 이수의 유동에 의하여 수행된다. 즉 수압, 토압에 대응해서 챔버내에 소정의 압력을 가한 이수를 충전 가압하여 막장의 안정을 유지하는 동시에 이수를 순환시켜 굴착토를 유체 수송하여 배토하는 공법이다.

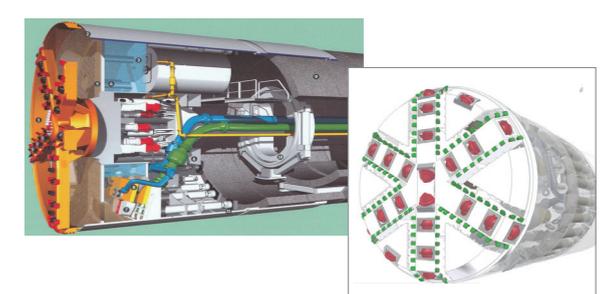
[그림 9] Slurry 셴드 TBM의 구성



Slurry 셴드 TBM은 가압된 슬러리를 막장압을 유지하는 데 사용하며, 굴착된 버력을 외부로 운송할 때도 슬러리가 사용된다. 커터챔버에 고농도의 이수를 투입 이수의 특성과 이수압을 이용해서 굴착면에 작용하는 토압과 수압에 대항시켜 절삭지반의 안정을 도모함과 동시에 굴착한 토사를 환류이수로서 유체수송하면서 굴진하여 광범위한 지반에 적용할 수 있다.

슬러리 TBM 장비는 굴착 챔버(전면 챔버)와 작업 챔버(후면 챔버)가 슬러리로 채워진다. 슬러리는 물과 벤토나이트 입자의 현탁액을 말하며, 굴착 챔버와 작업 챔버는 격벽으로 분리되어 있다. 두챔버 사이의 흐름은 격벽 바닥의 오프닝에 의해 가능하다.

[그림 10] Slurry 셴드 TBM의 모습

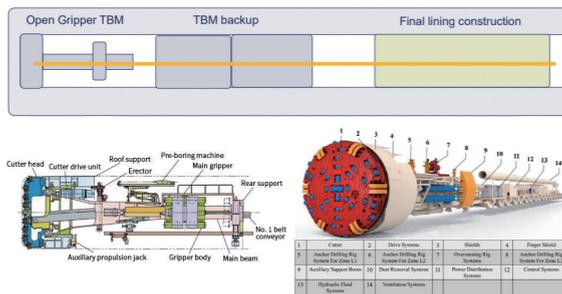


3. TBM 장비 구성과 복합화

3.1 TBM 장비 구성

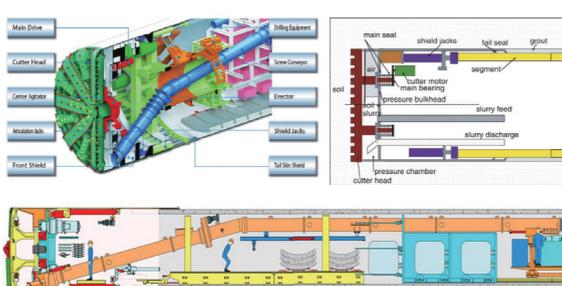
Open TBM은 디스크가 부착된 커터 헤드, 추진장치, 버력 운반 컨베이어 그리고 그리퍼로 구성된 본체, 후속 트레일러 그리고 후속 설비로 크게 세 가지로 구성되며 터널 굴진 후방에서 지보 설치 장치를 갖출 수 있다.

[그림 11] 오픈 TBM 장비의 구성



셸드 TBM은 본체와 후속설비 등으로 이루어져 있고 본체 부분은 굴진면 측에서부터 후드부, 거더부, 테일부의 3부분으로, 외피는 외판(SkinPlate)과 그 보강재로 구성되어 있다.

[그림 12] 셸드 TBM 장비의 구성

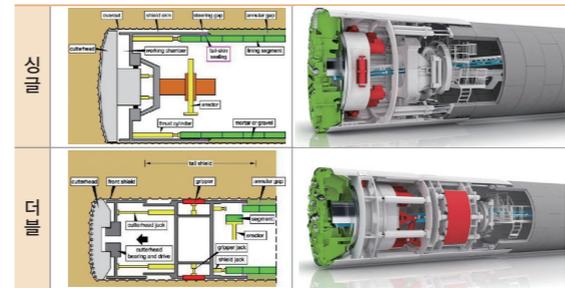


3.2 복합 셸드 TBM

복합 셸드 TBM은 오픈 TBM에서의 후방에서의 지보 및 콘크리트 라이닝 설치 문제점을 해결하기 위하여 막장면에 챔버가 없는 전면개방형 상태에서 세그먼트를 설치하는 TBM 장비이다. 그리퍼가 없으면 싱글 셸드 TBM, 그리퍼가 있으면 더블 셸드 TBM으로, 막장면 지지와 반력을 얻는 메커니즘을 혼

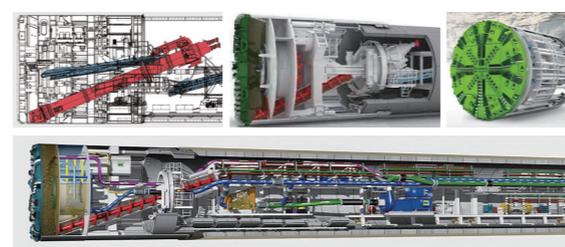
용한 것이라 할 수 있다. 막장면에 안정을 위한 별도의 장치(챔버)가 없기 때문에 Soft Ground에는 사용이 불가능하며, 최소한 막장면 자립이 가능한 지반조건에 적용이 가능하다.

[그림 13] 싱글 셸드 TBM과 더블 셸드 TBM



멀티 모드 셸드 TBM은 EPB와 슬러리 모드를 포함한 TBM 장비로서 복합지반에서의 지반조건 변화에 터널링이 가능하도록 개발되었다. 터널링 전 과정에서 최적의 안전성과 유연성을 제공할 수 있으며, 다양한 지반조건에 적용 가능하다.

[그림 14] Multi Mode 셸드 TBM



4. TBM 커터 헤드와 대단면화

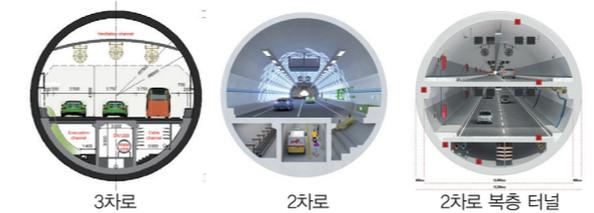
4.1 TBM 터널 단면과 대단면화

TBM 터널 단면은 원형이므로 NATM 터널 단면에 비하여 단면 규모가 크고 공간 활용성이 떨어지는 문제점이 있다. TBM공법을 적용한 도로터널에서는 상·하부 여유 공간을 환기 및 방재시설과 유지 관리 시설로 활용하게 되고, 터널 내에 슬래브를 설치하여 차량운행하중을 지지하고 공간을 확보하게 된다.

최근에는 TBM 단면이 직경이 14m 이상의 대단면화 되고

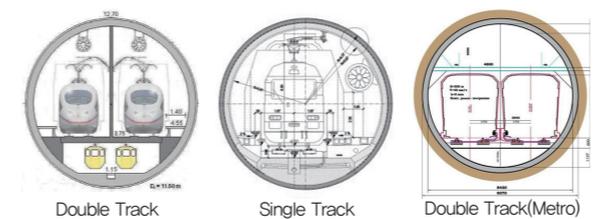
있으며, 중간 슬래브를 설치하여 공간 활용도도 높이는 복층(Double-decked) TBM 터널도 적용되고 있다.

[그림 15] TBM 도로터널 단면



TBM 철도터널의 경우 단선 (Single tube)와 복선(Double tube) 그리고 열차의 특성에 따라 단면 크기가 달라지는데, 일반적으로 단선 터널이 직경 7~8m, 복선터널이 직경 11~12m이다. 최근 철도의 고속화에 따라 대단면화되는 추세이다.

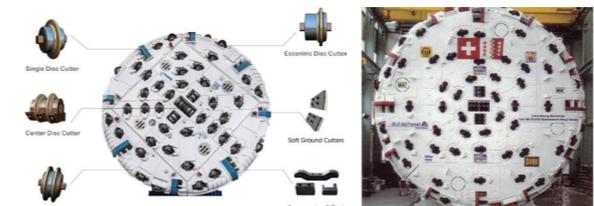
[그림 16] TBM 철도터널 단면



4.2 커터 헤드와 대형화

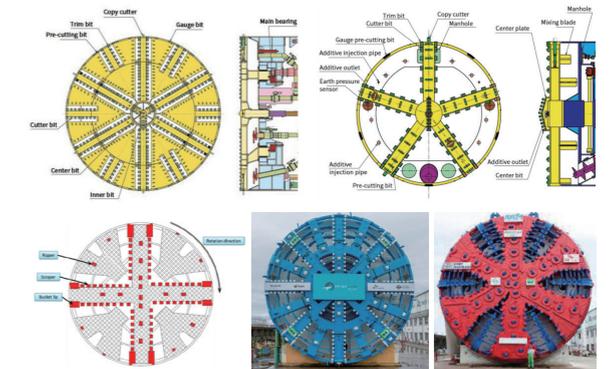
TBM에서 가장 핵심적인 부분은 지반을 직접 굴착하게 되는 회전식 커터 헤드이다. 커터 헤드는 TBM에서 터널의 굴착방향으로 최전방에 구비되어 있으며 회전에 의해 지반을 굴착하게 된다. 즉, 커터 헤드가 회전을 하면서 터널을 굴착하게 되고, 굴착된 토사나 암석은 커터 헤드의 개구부(opening)를 통해 후방으로 배출된다. 커터 헤드는 TBM의 굴착성과 굴착효율을 좌우하는 가장 중요한 부분이다.

[그림 17] 오픈 TBM의 커터 헤드



TBM 커터는 커터 헤드에 설치되는 굴착 공구로서 암반용 디스크 커터와 토사용 커터비트로 구분되며, 이들 커터는 커터 헤드 전면에 설치되어 회전하면서 지반을 굴착하는 역할을 한다.

[그림 18] 셸드 TBM의 커터 헤드



5. TBM 시공 프로세스와 자동화

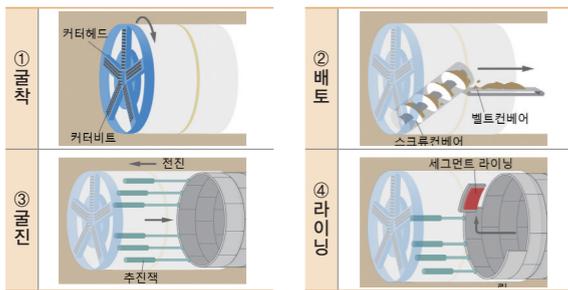
TBM 시공프로세스의 핵심은 TBM 장비의 설치이다. 일반적으로 야드에서 굴진하는 방법과 수직구에서 굴진하는 방법으로 구분되는데, 도심지 터널의 경우 수직구를 굴착하여 TBM 장비를 조립하여 굴진하게 된다.

[그림 19] TBM 터널 시공 프로세스



TBM 장비가 준비가 완료되면 초기굴진 과정을 거쳐 본굴진을 시작하게 된다. TBM 굴진은 커터 헤드의 회전과 추진력에 의한 굴착, 굴착토의 배토 및 운반, 추진력을 이용한 굴진 그리고 세그먼트 라이닝 운반 및 조립 순서로 진행된다.

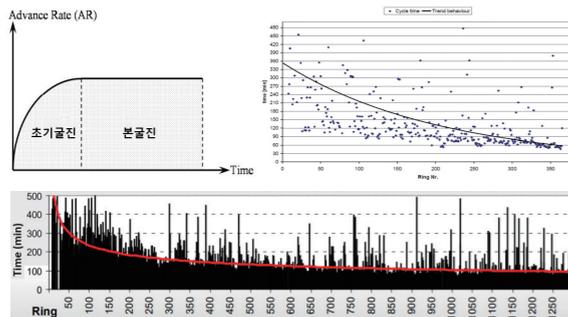
[그림 20] TBM 굴진 프로세스



6. TBM 굴진율(Advance Rate)과 급속 굴진

TBM에서 굴진속도는 매우 중요한 시공성 평가지표이다. 일굴진율(AR, Advance Rate)은 각 작업일 동안 굴착된 터

[그림 21] TBM 굴진율과 링조립 시간



[표 4] 주요 TBM 터널과 굴진율

| 프로젝트 | TBM 장비 | 굴진율 |
|----------------------|-----------------------------------------|--------------|
| West Gate Tunnel | 직경 15.6m 무게 4,000톤 길이 90m / EPB Shield | 평균 9m/주 |
| M30 Motorway Tunnel | 직경 15.2m 무게 4,000톤 / EPB Shield | 최대 188m/주 |
| Esme-Salihli Tunnel | 직경 13.77m / Crossover XRE TBM | 최대 28.5m/일 |
| Brenner Base Tunnel | 직경 7.9m 무게 1,800톤 길이 200m / Gripper TBM | 최대 61m/일 |
| Folio Line Project | 직경 9.9m / Hard Rock / Double Shield TBM | 평균 13~15 m/일 |
| Waterview Connection | 직경 14.4m 무게 2,800톤 / EPB Shield | 최대 452m/일 |



널의 길이로 정의되며 m/day로 표시된다. AR은 터널 프로젝트 공기 및 공사비 추정의 핵심 요소이며, 설계중 예측된 굴진율 값을 시공 중 확인하여 지반에 적합한 최적 TBM 운영에 반영하여야 한다.

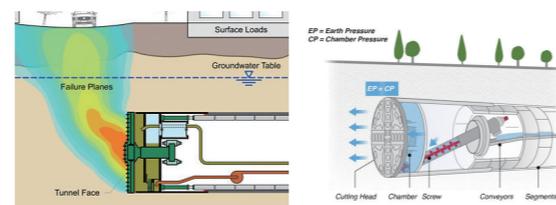
일반적으로 하나의 링을 완성하는 것을 링조립 시간과 TBM 장비의 가동시간과 다운 타임 등이 굴진율에 영향을 주는 요소이며, 가장 중요한 것은 지반조건 및 지반상태에 적합한 TBM 장비를 선정하여 운영하는 것이다.

7. 막장 안정성(Face Stability)과 고수압

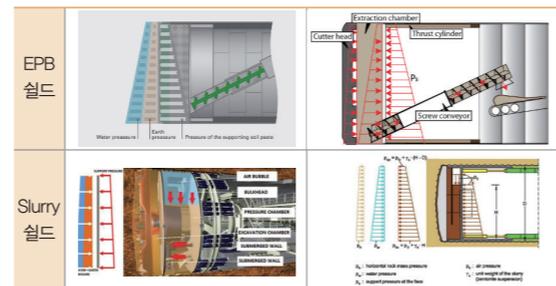
TBM 터널에서 굴착된 지반의 상태는 안정된 원지반의 상태로 토압과 수압이 균형을 이루고 있으나 TBM 터널 굴착이 이루어진 후는 막장과 터널 벽체로부터 토압과 수압이 내부로 작용한다. 쉴드 TBM은 챔버 내의 채워진 이토/슬러리 압력(Face Pressure)으로 막장의 토압과 수압을 지지하게 된다. 막장 안정은 토압 및 수압과 챔버 내의 압력을 조절하여 균형을 유지함으로써 지반교란을 최소화할 수 있고 이러한 균형이 깨지면 지반침하나 웅기, 지반함몰 등이 발생하게 된다.

EPB 쉴드 TBM에서 막장면(Face)의 지지압력은 굴진속도와 스크류 컨베이어의 회전수에 의해 제어되며 추진

[그림 22] 쉴드 TBM에서의 막장 안정성



[그림 23] 막장압 작용과 막장압 계산

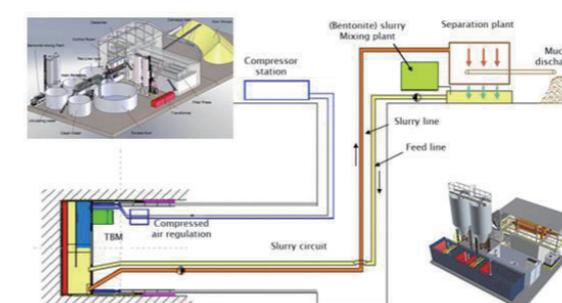


력에 의해 챔버 내에서 가압된 굴착토의 토압이 굴진면 전체에 작용해 막장의 안전성(Face Stability)을 확보하게 된다.

8. TBM 부대 설비와 첨단화

TBM은 본체, 후속설비, 부대시설로 구성되고 본체는 커터, 커터 헤드, 추진시스템, 클램핑 시스템, 이렉터 등이 있고 후속설비에는 벨트컨베이어, 광차가 있다. 부대시설은 버력처리장, 오탉수정화시설, 환기시설, 수전설비, 급수설비, 배수설비 등으로 구성된다. 특히 슬러리 쉴드 TBM에서는 벤토나이트와 굴착토가 혼합된 슬러리를 처리/분리하는 설비가 매우 중요하다.

[그림 24] Slurry TBM 부대설비



TBM 터널 작업장 계획은 TBM 장비의 조립, 해체, 발진, U-Turn, 지반조건 및 주변여건 등을 고려하여 수립해야 하며, 버력반출, 지보재 반입, 가시설 설치 등의 작업이 소정의 공정에 따라 원활히 진행될 수 있도록 수립해야 한다. 특히 도심지 TBM 터널의 경우 작업장 부지에 제한이 크다는 점에 유의해야 한다.

[그림 25] TBM 터널 작업장 계획

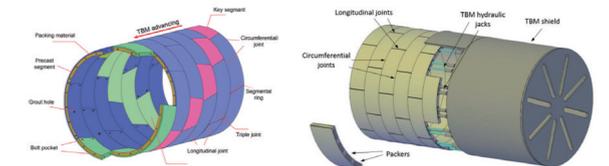


9. 세그먼트 라이닝과 고성능화

세그먼트 라이닝(Segment Lining)은 현장타설 콘크리트 라이닝과 달리 공장이나 야드에서 미리 제작된 세그먼트를 터널 내에 조립 설치해 완성하는 라이닝의 형태를 총칭한다. 세그먼트 라이닝은 쉴드 TBM 터널에서 공사 중의 안정성을 확보하고 영구적인 터널 라이닝으로 사용되는 중요한 구조체이다.

더욱이 세그먼트 라이닝은 쉴드 터널의 공사비에서 가장 큰 비중을 차지하기 때문에, 세그먼트의 경제성 향상을 위한 기술적인 개선 노력들이 이루어지고 있다.

[그림 26] 세그먼트 라이닝



세그먼트 폭이 넓으면 링 설치당 생산량이 증가하고 터널 길이당 접합부의 수가 감소하지만 TBM 운반/적재에서 공간을 더 많이 요구하고 터널의 곡선 구간에서는 문제가 많다. 현장에 가까운 세그먼트 제조 공장을 보유한 프로젝트는 운송비가 적고 품질 관리가 우수하다. 몰드에 대한 3D 스캐닝 및 검증은 시공 단계에서의 지연을 방지하기 위한 필수적인 단계이다.

[그림 27] 세그먼트 라이닝의 제작



10. TBM 스마트 기술과 디지털화

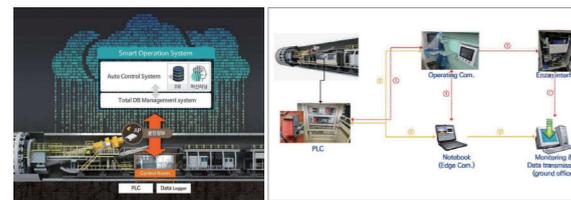
최근 TBM 스마트 기술은 TADAS(TBM Advanced Driving Assistance System)를 활용해 굴착 데이터와 지반정보를 실시간으로 분석하고 최적의 운전 방법 제시하여 TBM 운전 전에 활용하고 있다. TBM 터널 시공정보를 포함한 전체 현장의 현황정보는 BIM 기반 디지털 시스템과 중앙 통합운영 시스템, 본사-현장 통합 운영 시스템, 디지털화 된 현장들의 정보가 실시간으로 TBM 굴진 작업을 원격 지원·관리할 수 있다.

[그림 28] TBM 스마트 기술 적용(한강 하저 TBM 터널, 현대건설)



TBM 장비는 건설기술과 기계를 운영하는 기술들이 결합돼 상당히 융합적인 분야로서 BIM 기반으로 설계자와 시공자가 플랫폼 단위로 데이터를 공유하고, 공사 후 유지관리에도 활용하고 있다. TBM 데이터베이스(DB) 통합관리시스템과 자동운전시스템 간 연계, 스마트운용시스템과 TBM 제어시스템을 연결하는 에지컴퓨터 기술 개발 등을 진행했다. TBM 스마트 운용시스템을 완성하고 현장에서 운전제어시스템과 에지컴퓨터 연결 시험을 진행하고 있다. 이와 같이 TBM 터널에서는 첨단화된 TBM 장비에 다양한 스마트 기술이 적용되고 디지털 기술이 응용되어 TBM 터널 설계 및 시공의 자동화 및 디지털화를 달성하고 있다.

[그림 29] TBM 터널에서의 디지털 기술 응용



요약 Summary TBM 터널의 기술 특성과 트렌드

| Key Word | 특징 | 비고 |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 오픈 TBM VS. 쉴드 TBM | <ul style="list-style-type: none"> Hard Rock에서는 오픈 TBM 적용 Soft Ground에서는 쉴드 TBM 적용 오픈과 쉴드의 장점의 복합화 | |
| EPB 쉴드 VS. 슬러리 쉴드 | <ul style="list-style-type: none"> 토사지반 조건에 EPB/슬러리 선정 슬러리가 막장압 관리에 유리 복합지반에 EPB/슬러리 복합모드 | |
| TBM 장비구성과 복합화 | <ul style="list-style-type: none"> 커터 헤드를 포함한 굴진구동부 굴착도 차리를 위한 백업시스템 다양한 지반에 적용가능한 복합화 | |
| TBM 커터 헤드와 대단면화 | <ul style="list-style-type: none"> 토사용과 일반용 커터 헤드로 구분 커터교체를 위한 다양한 기능 커터 헤드 대단면화와 장비 대형화 | |
| TBM 시공프로세스와 자동화 | <ul style="list-style-type: none"> 굴착-추진-링 완성 반복 사이클 작업구-장비투입 및 TBM 굴진 시공프로세스의 자동화 추세 | |
| TBM 굴진율과 급속 굴진 | <ul style="list-style-type: none"> 지반조건에 따라 굴진율 차이 큼 시공시의 굴진율 관리 필요 터널 장대화에 따른 급속 굴진 중요 | |
| 막장 안정성과 고수압 | <ul style="list-style-type: none"> 쉴드 TBM에서 막장안정성 중요 막장압 관리를 통한 굴진 안전관리 해저저구간에서의 고수압 대응 | |
| TBM 부대설비와 첨단화 | <ul style="list-style-type: none"> 상대할 규모의 부대설비 작업장 슬러리 TBM-슬러리 처리설비 중요 다양한 종류의 특수장비/설비 필요 | |
| 세그먼트 라이닝과 고성능화 | <ul style="list-style-type: none"> 세그먼트 라이닝은 중요한 구조체 세그먼트 라이닝의 설계/시공기술 다양한 형태의 라이닝 요구 | |
| TBM 스마트 기술과 디지털화 | <ul style="list-style-type: none"> TBM 터널에 스마트 건설기술 적용 TBM 스마트 기술 개발 및 응용 디지털화를 통한 TBM 터널관리 | |

TBM Tunnel : Faster, Larger and Smarter

■ TBM 터널의 활성화 방향과 과제

최근 지하 터널을 개발하거나 복잡하고 어려운 지반 조건을 극복하기 위해 TBM 공법 시공이 늘어나는 추세이다. 해외의 경우 터널 공사 계획 시 TBM을 활용한 기계화 굴착공법을 우선 고려하고 특수한 경우에만 NATM 공법을 계획하고 있다. 국내의 경우 터널 공사비 문제, TBM 기술 및 경험 부족 등을 이유로 하저 구간, 지반이 매우 불량한 구간 그리고 민원이 상당히 심각한 도심지 구간에서만 TBM 공법을 적용해왔던 것이 현실이다.

TBM 공법은 소음과 진동이 저감되고, 굴착된 토사나 암반도 분진 없이 배출돼 도심 공사 시에 선호되며, 굴착 즉시 세그먼트를 설치하므로 안정성도 높다. 또한 굴진 속도가 NATM 공법에 비해 빨라 공사 기간을 줄일 수 있고 생산성도 높아 효율적이다. 토사부터 연암, 경암 등 다양한 지층에 적용할 수 있고 지하수압이 높은 지반에서도 안전하게 시공할 수 있다.

이러한 TBM 터널의 장점을 바탕으로 이제는 TBM 공법이 보다 활성화되고 적극적으로 검토되어야 하지만, TBM 터널 적용상에 많은 문제점이 있는 것이 사실이다. 특히 공사비 중심의 발주방식의 문제는 실제로 TBM 공법을 적용하

는 기술적 타당성에도 불구하고, 여러 가지 시공 중 리스크를 가지는 NATM 공법을 적용할 수 밖에 없는 현실이다. 또한 외국산 TBM 터널 장비의 기술 의존과 TBM 장비 운영 기술에 대한 경험 부족은 TBM 터널의 활성화에 대한 거대한 장벽이라고 생각된다.

국내에서는 오래전부터 터널 기계화 시공이 미래 터널기술의 핵심임을 인식하고 TBM 기술에 대한 연구개발을 활발히 진행해 왔으며, 국내 TBM 터널에서의 기술적 경험과 해외 현장에서의 기술 노하우 습득 등을 통하여 TBM 터널 기술에 대한 믿거름을 다져오고 있었다. 이제는 이러한 TBM 터널 기술에 대한 베이스를 중심으로 TBM 터널의 활성화를 위한 제도적 문제점을 개선하게 된다면 우리나라의 TBM 터널 기술력 확보와 미래에는 TBM 장비의 국산화에 이를 것이다.

이제 지하터널의 시대가 오고 있다. 다가오는 지하터널의 시대에 가장 중요한 이슈는 안전하고 튼튼한 지하터널의 구축일 것이다. 이는 TBM 장비의 첨단화, 시공 프로세스의 자동화, TBM 터널의 스마트 기술 적용 그리고 BIM 기반의 디지털 기술의 응용을 통하여 실현될 것이다. 터널 기술자 모두가 '스마트 TBM 터널과 디지털 지하 구축'에 진심으로 힘을 모아 나아갈 때이다.

