

## 대단면 TBM 터널 - 계획단계에서 고려되어야 할 기술적인 측면



오주영  
삼성물산(주) 책임

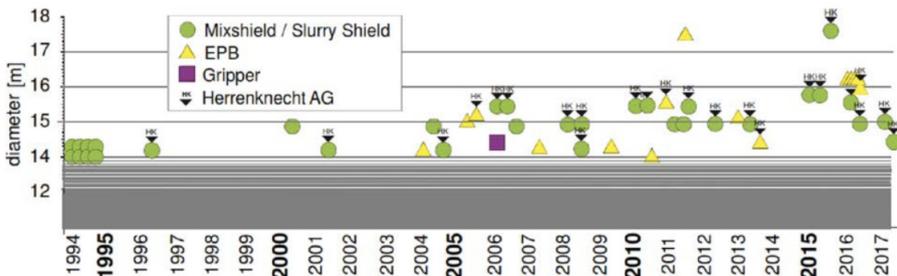


박현구  
삼성물산(주) 책임

### 1. 개요

1970년대 이후 다양한 TBM type의 개발/발전과 함께 TBM 직경 또한 증가하고 있다. 이러한 경향은 TBM 터널 계획에 있어서 새로운 option들이 요구되어지고 있다.

터널산업에서 확실한 정의는 없으나, 직경 14m 이상 규모의 TBM을 대단면 TBM으로 분류되어지고 있으며, 최근 약 20년 동안 완료되었거나, 현재 진행 중인 대단면 TBM 프로젝트가 약 49개로, 최근에 오면서 프로젝트 수가 점차 증가하고 있으며(그림 1), 향후 적용 건수가 비약적으로 증가할 것으로 예상된다.

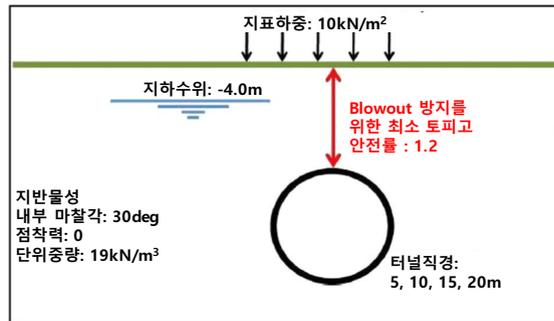


〈그림 1〉 1994년 이후 대단면 TBM의 적용 현황(Tunneltalk, 2014)

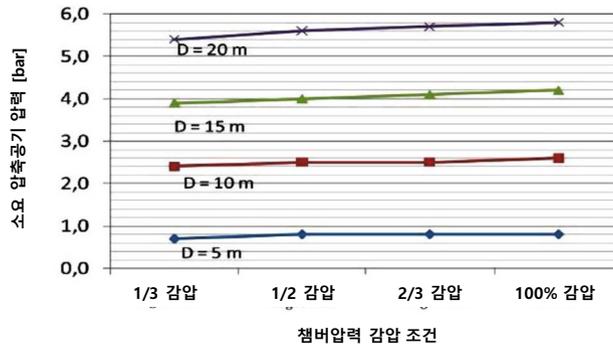
본 기사에서는 대단면 TBM 터널 계획시 기술적인 측면에서 고려되어야 할 사항을 몇 가지 기술코자 한다.

## 2. Cutter Head Intervention

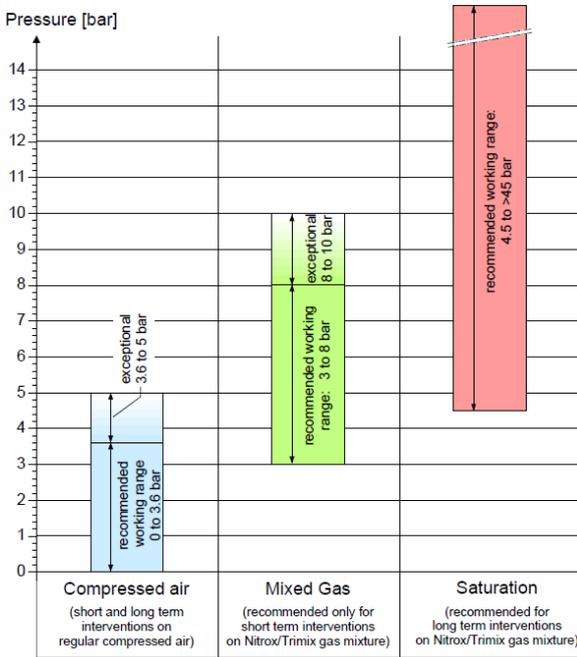
안전한 굴진, 특히 Cutter head intervention(CHI)을 위한 최소 토피고는 쉴드 TBM 직경이 증가함에 따라 함께 증가하게 된다. Thewes(2010)는 단순한 경계조건인 parameter study를 통해 앞서 언급한 쉴드 TBM 직경과 최소 토피고의 관계를 제시하였다(그림 2). 해당 연구에 따르면 챔버압을 완전히 제거하고 압축공기로 지지하는 경우, 쉴드 TBM이 5m에서는 소요 토피고가 약 5m로 쉴드 TBM 직경정도 수준이나, 쉴드 TBM 직경이 20m로 증가하는 경우 소요 토피고는 약 33m로 쉴드 TBM 직경의 약 1.65배 수준까지 확보가 필요한 것으로 나타났다(그림 3). 결과적으로 CHI를 위한 압축공기 압력이 쉴드 TBM의 직경의 영향을 받아 쉴드 TBM 직경이 10m인 경우 약 2.5bar, 15m인 경우 약 4bar, 20m 규모의 쉴드 TBM에서는 약 6bar의 압력을 필요로 하였다. 압기 내에서 허용 체류시간은 압기 압력 증가와 함께 감소하게 된다. 일반적인 압축공기 내 작업은 최대 3.6bar 이하에서 가능하다. 따라서 쉴드 TBM 직경 증가함에 따라 소요 압축공기 압력이 증가하기 때문에 예측되는 압력 범위에 따라 적절한 CHI 방법을 선정하여야 한다(그림 4).



〈그림 2〉 Parameter study 경계조건(Thewes, 2010)



〈그림 3〉 쉴드 TBM 직경과 챔버압력 감압조건에 따른 압축공기 압력(Thewes, 2010)



- ▶ Compressed air 0-3,6 bar, up to 4,5bar in exceptional cases, short duration
  - decompression in TBM airlock
  - state of the art,
  - coverage by rules and regulations
- ▶ Mixed gas for short duration up to 6,0 bar
  - decompression in TBM airlock
- ▶ Saturation for long term interventions above 4,5 bar
  - above ground hyperbaric habitat (crew transfer shuttle)

〈그림 4〉 압력조건에 따른 Cutter head intervention 방법

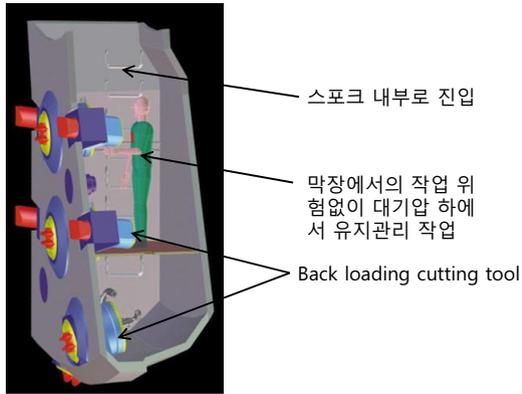
### 3. 대단면 TBM의 기술적 고려 사항

#### 3.1 Cutter head 설계

실드 TBM 직경이 증가함에 따라 굴진면 지지를 위한 챔버압력도 증가하게 된다. 이에 따라 대단면 실드 TBM에서의 굴착 방법과 Cutting tool 교체에 대한 기술적인 고려가 중요하다.

실드 TBM의 굴착량은 실드 TBM 직경의 제곱에 비례하여 증가하게 되므로, 실드 TBM 직경이 증가함에 따라 Cutter head의 굴착 효율을 증가시켜야 한다. 이는 Disc cutter, Shell bit 등 각 Cutting tool의 굴착 효율을 증가시키는 방법과 동일 궤도 상에 2개 이상의 Cutting tool 설치하는 방법을 선택할 수 있다. 후자의 방법은 초기 굴진 중 효과를 확인하여 본굴진에 적용여부를 결정할 필요가 있다.

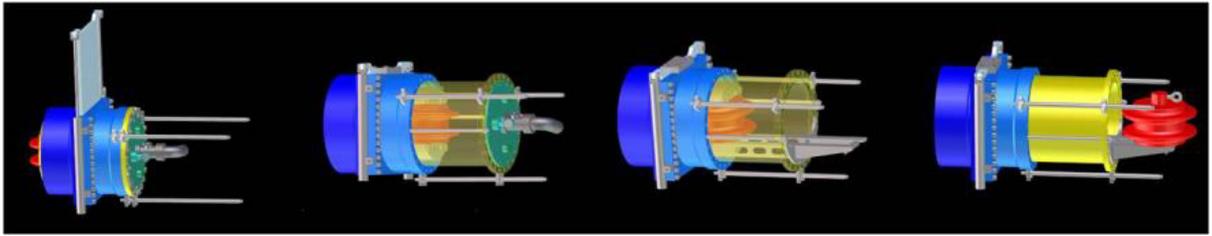
실드 TBM 직경이 증가함에 따라 Cutting tool의 연동거리와 굴진면 지지 압력의 증가하게 된다. 이는 중/소구경 TBM에 비해 Cutting tool의 큰 마모 원인이 되며, 이로 인해 Cutting tool 교체횟수가 증가하게 된다. 이러한 잦은 Cutting tool 교체는 대단면 TBM 굴진 효율을 저하시키게 되며, 챔버 진입 횟수 및 작업시간을 경감하기 위한 대책을 실드 TBM 계획단계에서 고려해야 한다. 대단면 TBM에서의 Cutting tool 교체 방법에서 대해서는 장비 제작사에서 여러 가지 방법을 소개하고 있으며(그림 5), 실드 TBM 직경에 적절한 방법을 선택하여 tool 교체로 인한 정지시간을 최소화할 필요가 있다.



(a) Accessible 커터헤드



(b) 작업 광경



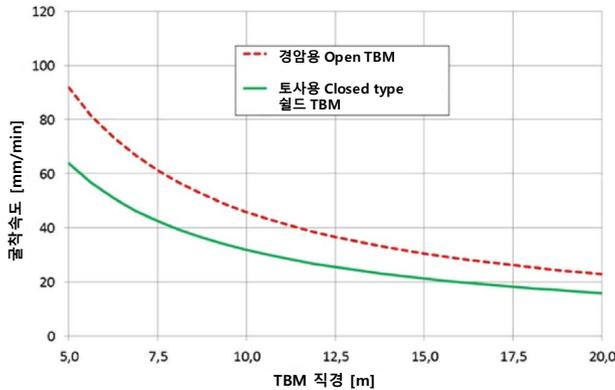
(c) 디스크커터 분리 순서

〈그림 5〉 Accessible 커터헤드(Elbe River Tunnel in Germany)

### 3.2 굴착 속도

TBM의 굴착속도 또한 TBM의 직경에 영향을 받게 된다. 일반적으로 Cutting tool 속도는 Closed type의 쉴드 TBM은 최외각에서 40m/min, 경암용 Open TBM은 최대 180m/min 정도로 수준이다(Burger 등 2018). 굴착경이 커질수록 최외각부의 속도가 증가하므로 커터헤드의 회전속도를 경감, 즉 굴착속도를 감소시켜야 한다. 그림 6은 일정 수준의 근입깊이(Closed type 쉴드 TBM 25mm, 경암용 Open TBM 8mm)에서 TBM 직경에 따른 굴착 속도의 변화를 보여 주고 있다.

TBM 직경의 증가함에 따라 굴진면 면적이 증가하여 굴진 중 복합 지반 조우 가능성이 증가하게 된다. 특히 암반과 토사로 이루어진 복합지반 통과가 예상되는 경우, 암반용 굴착도구와 토사용 굴착도구를 혼용하게 된다. 이는 암반에 의한 근입깊이의 감소와 토사로 인해 회전속도의 감소로 굴진속도가 현저히 감소하게 된다. 따라서 대단면 TBM 설계시에는 굴착속도를 향상할 수 있는 방안을 고려하여 한다. 이에 대한 하나의 대안으로 2중 Cutter head를 적용하여 내측 Cutter head에서는 회전속도를 높여 운영하고(그림 7), 외측 Cutter head는 회전속도를 낮추고, 한 궤도에 다수의 cutter를 설치하여 복합지반에 대응이 가능하다. 또한 내측과 외측 cutter head의 회전 방향을 반대로 운영하여 cutter torque의 감소라는 부가적인 효과를 얻을 수 있다.



〈그림 6〉 쉴드 TBM 직경 증가에 따른 굴착속도 변화(Burger 등, 2018)



〈그림 7〉 이중 Cutter head

### 3.3 후방설비 및 Logistics

12m 이상의 터널 내경에서는 3~4층으로 구성된 후방대차 투입이 가능하며, 중/소단면 TBM에 비해 짧은 후방대차의 제작이 가능하다. 또한, 다층으로 구성된 후방대차로 인해 세그먼트 feeding 공간이 넓어져 feeding 속도가 빨라지는 부가 효과를 얻을 수 있다.

일반적으로 대단면 TBM에서는 굴착토 배토를 위해 연속배토 적용이 일반적이다. Slurry TBM의 Slurry transport system 뿐만 아니라 EPB TBM과 경암용 Open TBM에서도 벨트 컨베이어가 적용되어 연속 배토가 가능하다.

### 3.4 Invert 설치

과거 대단면 TBM의 경우, 후방대차 내부에서 Invert 부분 시공이 가능하도록 Logistics를 위한 공간 뿐만 아니라 Invert 시공을 위한 공간을 고려하여 제작하였다(그림 8). 이러한 장비 Concept은 후방대차 연장의 증가를 야기할 뿐만 아니라 Logistics의 효율에 영향을 미쳤다. 최근에는 TBM 굴진과 Invert 및 터널 내부 구조물(2차 라이닝 등)의 시공이 별개 공정이 되도록 별도의 후방대차를 운용하고 있다(그림 9). 이 대차는 TBM 굴진에 이용되는 후방 대차와 간격을 두고 운행되며, TBM 굴진과는 별도로 독립적으로 후방에서 Invert 및 터널 내부 구조물 작업이 이루어진다.

## 4. 결론

과거 NATM 공법이 주를 이루던 대단면 터널 시공이 최근 대단면 TBM의 도입으로 새 국면을 맞이하고 있다. 대단면 TBM 터널의 시공은 중/소단면 TBM 터널에서는 고려되지 않는 다수의 기술적인 측면이 고려되어야 한다. 앞에서 대단면 TBM 터널 계획 수립시 고려되어야 할 사항들에 대해 간략히 기술하였다. 이외에 간과해서는 안되는 주요 항목들이 존재하며, TBM 기술의 비약적인 발전과 함께 이러한 항목들이 증가할 것으로 사료된다. 성공적인 대단면 TBM 터널의 시공을 위해 터널 기술자들의 관심과 노력이 요구되어지는 바이다.



〈그림 8〉 터널 내부 구조물 시공(후방대차 내부, Burger 등, 2018)



〈그림 9〉 터널 내부 구조물 시공 후방 대차(Burger 등, 2018)

#### 참고문헌

1. Thewes, M. (2010) Shield tunneling technology for increasing difficult site conditions, Proceedings of the 11th International Conference Underground Construction Prague 2010, Czech Tunneling Association, Prague 2013.
2. Burger, W., Thewes, M., Wehrmeyer, G. (2018) Supersize TBM – Designaspekte bei she grossen Tunnelvortriebsmaschinen (TVM), Handbuch fuer Tunnelbau.
3. TunnelTalk (2014) Tracking the world's mega-TBMs, <http://tunneltalk.com/Discussion-Forum-Mega-TBM.php>.

[본 기사는 저자 개인의 의견이며 한국터널지하공간학회의 공식입장과는 무관합니다.]