

## EPB or Slurry Type TBM? (해저 터널 TBM 공법의 선정에 대한 논고)



지양률  
강릉건설 부회장  
TBM Specialist

### 1. 서론

근래에 TBM공법의 주요 관점중의 하나가 깊은 해저에서 TBM 적용이 가능한가? 가능하다면, 어떤 Type의 TBM 시스템 적용이 가능한지이다. 과연 EPB Type TBM 장비와 Slurry Type TBM 장비의 차이점은 무엇이고, 이 다른 두가지 공법의 장비 선정의 기준은 무엇인가? 또한 심해저 하부 10 bar 이상의 압력을 받는 고수압 구간에서 굴착과 차수가 가능한 장비 시스템은 무엇인지, 오늘날 TBM 제작 기술상 지층뿐 아니라, 열악한 토압과 수압 조건하에서도 안전한 터널굴착이 가능한 TBM 시스템은 무엇인지 정확한 판단이 필요한 시점이며, 이를 통해서 터널의 기계화 시공의 안전성을 높여야 한다.

### 2. 개요

대심도 해저터널공법으로 사용되는 TBM 공법으로 일반적으로 차수효과가 큰 Slurry Type TBM 과 Convertible Type TBM이 사용되고 있으나, 간혹 EPB TBM의 대심도 해저터널 적용사례 발표도 나오고 있어, 과연 어떠한 방법이 대심도 해저 터널 굴착에 유리하고, 이러한 어려운 토압과 수압 조건에서 적용가능한 TBM공법에 대해서 많은 의문점이 발생하고 있다. 그러나, 이러한 문제에 대해서 정리가 되어 있지않아 이를 정립하는 방법으로 당사에서 참여 중인 가스공사가 발주하여 현대건설에서 수주한 진해-거제 주배관 1공구 건설공사 해저 통과 구간 TBM 공법에 대한 사례연구를 실시하여, 현장에 적합하고, 안전한 TBM공법이 무엇인지 검토하는데, 그 초점을 맞추었다.

해저 90-100m 하부에서 터널을 굴착한 사례가 국내에는 전무하므로, 세계적인 심부해저터널 공사 자료를 조사하였고, 현재 현장에 주어진 조건 속에서 TBM장비 제작

사의 제작가능성 검토의견 등에 관한 자료를 참고 하였다.

거제-진해 가스관로 1공구중 거제구간은 Slurry Type TBM으로 설계되어 있으나, 진해구간은 EPB Type TBM으로 설계되어 있어, 그 안전성에 대해 의구심을 갖게 하고 있다. 해상 터널막장수압이 9bar의 고수압이 작용하는 것으로 되어 있는데, 과연 이러한 자연 조건하에서 EPB Type TBM 적용이 가능한지? 또는 대안으로 Slurry Type TBM 이나 Convertible Type TBM으로 변경해야 할지 하는 문제는 터널구간의 지반상태, 터널내 작업공간, 막장면 압력조건, 터널의 사용목적 및 크기 등을 고려하여, 결정하여야 하며 터널굴착중 안전성과 경제성을 확보 할 수 있어야 한다.

는 고수압 9bar의 수압하의 해저터널공사이나, 일반적으로 알려지기를 EPB Type TBM의 경우 9bar의 고수압에서 막장의 안정성확보가 어려우며 실제적으로 9bar의 수압을 1bar의 압력으로 감압시켜줄 적절한 특수 대구경 Screw Converyor 설치에 여러 가지 제약조건을 안고 있다. 직경 2.8m의 적은 터널 단면을 고려 할 때 감압을 도와줄 또하나의 Screw Conveyor의 설치 또한 시공이 제한적인 상태이다. 이를 위해 각종 부속시설의 설치가 필요한데, 냉정히 볼때, 9bar의 감압기능을 갖춘 대형 특수 Screw Conveyor의 설치가 소구경 직경 2.8m 정도의 가스 배관 터널에서는 불가능하며, 또한 소구경 터널에서 이러한 굴착 조건을 만족하는 EPB Type TBM 장비를 제작하기도 제작사와 협의의 결과 어려운 것으로 밝혀졌다.

### 3. 조사방향

오늘날 전세계적으로 환경친화적인 Modern High-Power TBM의 개발과, 특히 도심지의 발파를 금하는 지역이 늘어나면서 터널기계화 시공인 TBM 공법이 널리 사용되고 있고, 또한 해저터널공법으로 완전차수가 되고, 터널내 안전시공이 가능한 TBM 공법이 성공적으로 활용되고 있다.

문제의 거제-진해 가스관로 현장은 국내에 사례가 없

### 4. 거제-진해 해저 가스 터널 설계 현황

#### 4.1 사업개요 및 터널굴착계획

본 터널공사는 한국가스공사에서 부산 및 영남권에 안정적인 천연가스 공급을 위한 사업으로 “진해-거제” 주배관 제1공구 건설공사이다. 소재지는 경남 창원시 진해구

표 1. 주요 굴착 공정

공종		연장	내용	비고	
토목	육상	주관로공	6.7km	- 개착 : 6.5km 강관압입 : 0.2km(D=1,200mm)	L=15.5km
	해상	Pipe Jacking TBM	1.0km	- 1구간 : 0.4km(D=1,500mm) - 2구간 : 0.6km(D=1,500mm)	
		Shield TBM	7.8km	- 진해구간(E.P.B Type 쉴드) ① 수직구 : 굴착심도 89.8m(D=15m) ② 추진공 : 추진연장 3.5km(D=2,800mm) - 거제구간(Slurry Type 쉴드) ① 수직구 : 굴착심도 94.2m(D=15m) ② 추진공 : 추진연장 4.3km(D=2,800mm)	
기계 및 건축		-	- 주배관 매설 : φ30" ×15.5km 공급관리소 : 제도B/V:1개소		



그림 1. 주배관 노선도

제덕동에서 거제시 작목면일원으로 주요 사업 계획은 표 1과 그림 1을 참조하기 바란다.

## 5. 지반조건

기본설계시 작성된 지반정보는 거가대교 저도의 자료, 인근 송도 준설토 투기장의 조사자료, 시추자료 등을 토대로 터널의 종단 계획이 수립된 상태이다.

터널의 해저하부 통과 심도는 80~83.2m 구간으로 암반의 투수계수는  $2.51 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-11}$  mm/sec로 거의 불투수층이며, 암반의 일축 압축강도는 51.4~132.2MPa로 보통암에서 경암정도의 분포를 보이고 있다.

## 6. 해저터널의 굴착공법

해저터널 공법으로 발파공법, TBM공법, 침매터널공법, 부유터널(Floating Tunnel) 공법등이 사용이 되나, 일반적으로는 고수압과 차수효과가 큰 Slurry Type TBM이 가장 널리 사용되고 있다. 세계적으로 수압 16.8bar까지 Slurry Type TBM 장비가 심부 해저터널공사에 적용되어 성공적으로 굴착을 마친 사례가 있다.

EPB TBM은 기본적으로 4.5bar 이상의 추력을 주기도 어렵지만, 장비 자체의 Sealing System이 고수압에 견디기 어렵고, 고수압하의 차수 및 고수압의 감압에도 문제가 발생할 수 있다.

터널의 공간이 협소한 경우에는 차수 및 감압이 어려

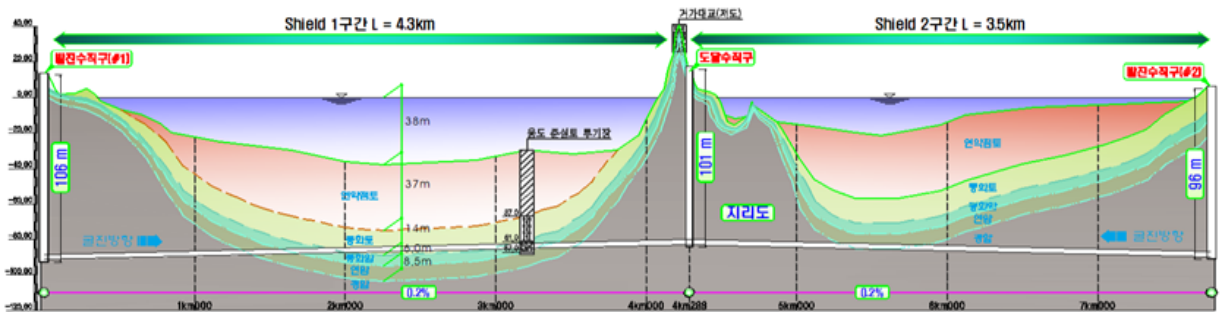


그림 2. 터널의 계획종단 (기본설계)

울 수 있으며 발생될 버력 자체도 지층이 점토층등 불투수층이 아니라서, 특수첨가물을 막장에 주입하여 버력을 불투수층으로 만들어 줘야 하는데, 수압이 강해 이 재질 변화를 통한 차수도 불가능하다.

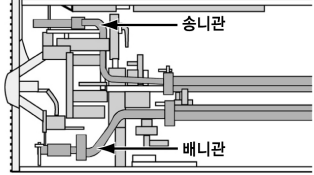
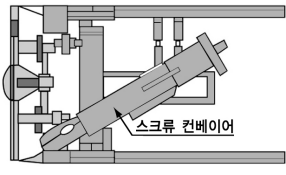
## 7. 지반조건에 따른 TBM 공법의 선정

일반적으로는 EPB TBM 이 더 널리 사용되고 있으나, 지반공학적인 조건에서 보면 EPB TBM은 점착력이 좋은 점토나 실트 층에 주로 사용이 되고 지하수위가 낮거나,

수압이 낮은 곳에서 시공성이 좋고, 풍화토, 풍화암, 연암, 보통암까지 장비 동력에 따라 적용이 가능하다. 굴착 작업을 개선하기 위해서 Bentonite, Foam 등 첨가제를 사용하기도 한다.

반면에 Slurry Type TBM은 사용하는 Slurry 인 Bentonite 와 버력을 분리해 주는 Separation Plant를 설치해야 하는 번거로움이 있으나, 지하수위가 높은 하저나 해저 터널에서의 완벽한 차수가 되기 때문에 적용성이 좋고, 모래 자갈층 같이 점착력이 부족한 층적층에서는 Bentonite 를 막장 전방에 주입하여 점착력을 높여 터널 막장 전방의 Sink Hole을 방지하며, 버력표면이 거칠어 Slurry Pump

표 2. 막장 안정화를 위한 고심도 해저터널 굴착 장비 선정

주요시방	Slurry Type TBM	EPB Type TBM
최대 적용 수압	16.8bar (Lake Mead Tunnel, 미국)	4.5bar (국내는 3bar)
장비 개요도		
현장 주의사항	버력처리 및 Slurry 주입 고압 Pump System 필요 Clay층 Blockage 발생 고수압하에서 Cutter 교체 문제 고수압에 따른 작업교대 시간(4교대)의 줄임 고수압하에서 작업자의 감압시스템 적용 잠수병 예방 필수	Sealing 문제, 감압문제 고수압하에서 Cutter 교체문제 고수압에 따른 작업교대 시간(4교대)의 줄임 고수압하에서 작업자의 감압시스템 적용 잠수병 예방 필수
주요시방	9bar 고수압에 따른 1) 장비 Sealing System - Main Drive Sealing - Steering Cyliner Sealing - Probe Drill Device Sealing - Push Cylinder Sealing (Articulation) - Tail Skin Sealing 2) Cutter Sealing System 3) 고수압하 Cutter 교체 시스템 4) 고수압에 견딜 고압력 Slurry Pump System Airlock: Air Mode 4bar 이하 Trimix mode 4-7bar Saturation 7bar 이상	적정한 시방 미개발중
적용 TBM Type	O	X

를 이용시 벤토나이트가 윤활 작용을 하여 Slurry Pipe를 보호하고, 적은 에너지로 버력 처리가 가능하게 된다.

이때 주의 사항은 현장에서 Slurry TBM의 경우 Mud Engineer 가 있어, Bentonite의 점도, 비중등을 버력의 거칠기에 따라 매일 조정해 주어야 한다.

무조건 Bentonite를 현장에서 아껴서 적게 쓰다 보면, 오히려 값비싼 Slurry Pipe가 고장나 시스템이 가동 중단이 되는 경우가 생겨 시공사에 큰 피해를 가져 오는 경우가 많은데, 전체 TBM Operation System에 대한 교육과 이해 부족이라 판단된다.

EPB TBM의 경우 버력의 점토 성분이 줄어 버력의 투수성이 늘어 날 경우는 막장 밖의 지하수가 바로 장비 내로 침투 하므로 이럴 경우 Foam 같은 첨가제를 투입하여, 버력을 불투수층으로 만듦과 동시에 부드럽게 Screw Conveyor를 통과 하도록 하여야 한다.

Slurry TBM의 경우 Slurry Pipe 가 막히는 Blockage 현상이 간혹 발생 하는데, 이경우는 버력이 Clay 층등으로 바뀌어 점착력이 큰 버력이 나올때 아무런 생각 없이 계속 Bentonite를 주입하며 두물체가 엉겨붙어 Slurry Pipe 를 막아 버리는 경우로 현장이 All-Stop 하여 시공사에 피해를 주기도 한다.

이런 경우는 Bentonite 대신 청수를 주입하여야 하는데, 우리나라 현장에서는 시스템의 이해 없이 무조건 자재를 남기려 하는 경우가 많아 소탐 대실의 현장을 많이 보게 된다.

장비 선정, 장비 사양 설계시 현장의 지반 조건을 면밀히 조사하여 장비설계에 반영이 되어 하며, 현장 굴착시 도 늘 전문 TBM Engineer의 관리하에 변하는 지층, 토압 상태에 따른 적절한 장비 운영이 필요하며, 이는 Software 부분인 Engineer의 몫이라 하겠다.

## 8. 결론

유로터널에서 Chalk Marl Rock이 Compact 하여, 큰 수압이 걸리지도 않았지만, Open Mode Single Shield

TBM은 고수압하에서 굴진 효율이 좋지 않았고, 단층대에서 물도 많이 들어와, Segment 설치에 어려움이 있었다. 과거 오류가 있는 발표내용과 달리 EURO Tunnel은 EPB TBM 이아니라 암반용 Single Shield TBM으로 분류하는 것이 적절하다. 만약 그논문 대로 11bar가 걸렸다면, EPB TBM은 해저에서 터져 버렸을 것으로 자료를 재확인 해야 할 사항이고, 11Bar를 어떻게 1980년대 장비가 장비내에서 감압을 1 Bar로 하고, 11Bar의 추력을 내어 EPB 기능이 가능한지 전혀 이해가 가지 않는다. 오늘날도 제작 불가능한 장비를 Euro Tunnel에 사용했더니? Disc Cutter의 Bearing 윤활류 Box도 고수압대비 Sealing이 안되어, Bearing 기능이 저하되어, 특수 Sealing이 필요한데, 이 기술은 오늘날도 개발중인 기술이다.

일반적으로 4.5Bar이상의 압력이 걸리는 곳에서 EPB TBM을 사용한 사례가 많지 않으며 최근에 6Bar 정도에 EPB를 사용한 기록이 북미지역(2013)에 있으나, 차수품질이 확보되지 않아 시공시 어려움을 겪은 사례가 있다. 제작사에서 위험요인 때문에 제작하기 어렵다는 9Bar 수압하의 EPB TBM공법은 9Bar의 현장에 적용시 굴착 및 차수에 여러가지 어려움이 발생할 수도 있다.

이러한 EPB TBM은 근본적으로 차수 및 9bar의 감압도 어려우며, 9bar의 추력도, 불확실 할 수 있다. 또한 수압 때문에 Cutter 교환 및 Cutter의 Sealing 도 불가능하여, Cutter의 Bearing 기능이 제 기능을 낼 수가 없고, 9Bar의 압력이 걸린다면, TBM 장비내 Operator는 잠수병에 걸릴 확률이 높고, 이런 경우, Air Lock에서 감압해야 하고, 지상에 나와서도 1-2주는 감압실에서 생활해야 잠수병을 면할 수 있다. 이런 여건에서는 Slurry Type도 작업하기는 쉽지만은 않다. 국내 기술로 어떻게 9Bar 이상으로 Bentonite를 주입한다 말인가? 물론 미국 Las Vegas의 상수도 터널인 Lake Mead Tunnel에서 Herrenknecht Mix Shield TBM 직경 7.18m의 장비가 16.8Bar 수압에 대응할 수 있도록 주입을 한 경우가 있지만, 이러한 조건에 대해서는 공법 및 장비선정에 있어서 지반조건 및 장비특성을 고려한 세밀한 검토가 필요한 것으로 판단된다.