



고속 터널굴착과 터널보링머신 동향

장수호 | 한국건설기술연구원

이용범 | 한국기계연구원

[요약문]

도로 및 철도는 차량의 고속화와 신속한 물류의 유통을 위해 직선 및 수평화가 절실하게 요구되며, 국내 건설구간의 약 50~70%가 산악지형으로서 터널공사가 필수적으로 요구된다.

국내터널굴착은 주로 발파에 의한 NATM(New Austrian Tunneling Method)으로 공사가 이루어지고 있으나, 굴착효율이 낮으며 안전사고의 위험성이 높다.^[1] 해외에서는 급속한 시공을 위하여 TBM(Tunnel Boring Machine)의 적용 사례가 증가하고 있다. 그러나 국내에는 TBM에 대한 연구가 거의 전무한 상태이고, TBM 터널의 설계·시공 기술과 경험이 미흡하다.^[2]

최근 대도시의 지하터널과 장대터널의 수요가 증대되어 TBM터널시공 기술과 TBM장비의 국산화가 절실하게 요구되고 있다.

본고에서는 국내의 주요 TBM 시공현황과 전망을 정리하여 TBM 터널 기술의 확보가 매우 시급함을 상기시키고자 하였다.

1. 터널 굴착공법

현재 터널굴착 공법은 종래의 재래식 터널공법(conventional tunnelling method)인 그림 1의 NATM과 기계화시공법(mechanized tunnelling method)인 그림 2의 TBM으로 양분되고 있다.

국내에서는 지하철, 도로 및 철도 등 대부분의 터널에서 NATM을 적용하고 있다. 일반적인 시공순서는 첫 번째로 화약장전을 위해 2m 깊이 이상으로 천공작업을 한 후 형성된 구멍에 화약을 장전하고, 발파 후 갱내 환기를 시키고 발파된 버력을 제거하고 부석을 정리 한다. 그 다음 굴착터널의 안정성을 확보하기 위하여 뿔어붙임 콘크리트인 숏크리트와 록볼트를 주지보재로서 시공하게 된다. 마지막으로 굴착터널의 안정성을 파악하기 위한 계측을 실시하는 사이클을 반복하게 된다. 이때 일반적으로 발파굴착에 의한 굴진율은 1일 2회 발파를 기준으로 할 때 약 4~6m/일이다. 이와 같이 발파굴착은 25~30 m/일을 굴진하는 TBM 시공에 비해 굴진속도가 약 15% 수준으로서 현저하게 낮고 위험성과 열악한 작업 환경조건으로 점차 기피되고 있는 공법이다.

전세계 10대 초장대 터널을 분석하면 50% 이상의 터널이 TBM으로 시공되었고, 향후 시공계획 터널 또한 TBM이 절대 우위를 가지고 있다. 이와 같은 현상은 재래식 터널공법과 비교하여 TBM 시공이 가지고 있는 다음과 같은 장점들 때문이다.^[3]

- 작업 환경이 공장과 유사하여 매우 쾌적하고 안전하다.
- 굴진속도가 매우 높고, 시공이 연속적으로 이루어지기 때문에 부가 공사를 최소화한다.
- 모든 시공과정의 자동화로 인해 시공 사이클의 향상이 가능하다.
- 주요 시공변수(굴착 버력의 양, 굴진면에 작용하는 지지압, 여굴, 터널 주변의 지반 변형, 지표침하 등)들을 측정하고 관리할 수 있다.



- 소음·진동과 분진이 매우 낮고 지하수위의 교란을 최소화할 수 있다.
- 프리캐스트 세그먼트를 사용하기 때문에 시공 품질을 향상시킬 수 있다.
- 재래식 터널공법과 비교하여 총 공사비용이 적은 경우도 종종 있다.

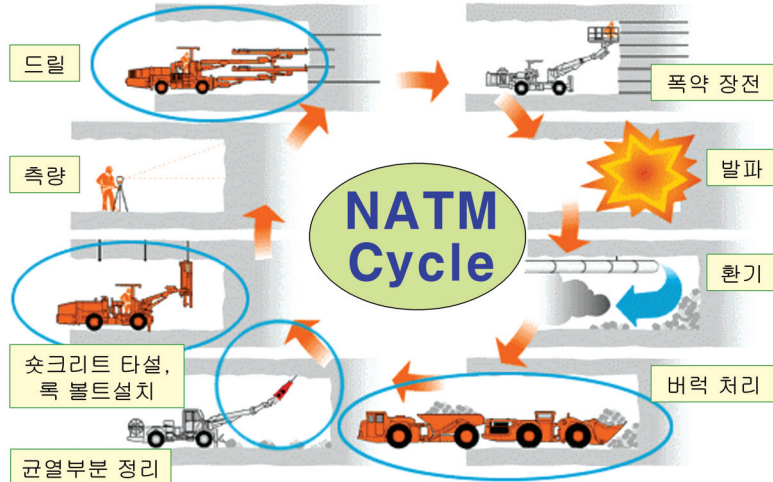


그림 1. NATM터널의 시공 사이클

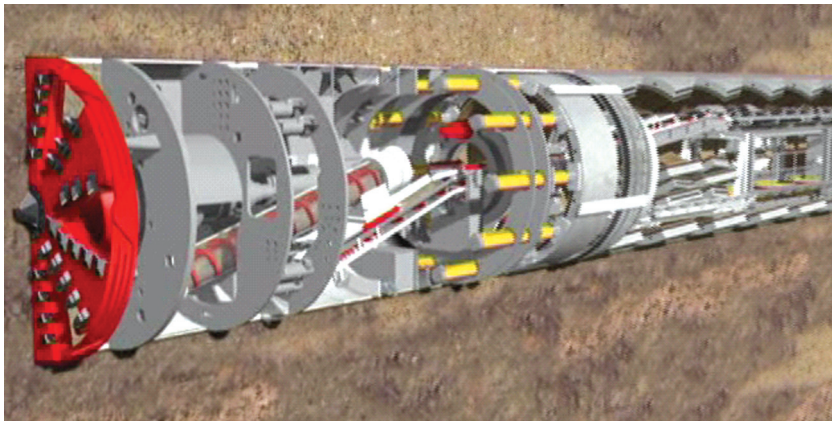


그림 2. TBM 굴착시공

2. 초장대 터널의 현황 및 시공법

앞서 설명한 바와 같이 전세계 10대 초장대 터널을 분석하면 50% 이상의 터널이 TBM으로 시공 또는 완공되었음을 확인할 수 있다(표 1). 특히 지질조건이 매우 불량해서 NATM을 적용한 일본의 하코다(Hakoda)터널, 이와테-이치노에(Iwate-Ichinoe)터널 및 이이야마(liyama)터널을 제외하면, 최근의 세계적인 초장대 터널 프로젝트에서 TBM이 차지하는 비중이 절대적임을 확인할 수 있다.^[4]

표 1. 시공 중 또는 운영 중인 세계 10대 초장대 터널

터널 명	연장 (km)	국가	용도	터널 시공법
Gottard Base Tunnel (시공 중)	57.07	스위스	철도	4대의 경암반 TBM
Seikan Tunnel	53.85	일본	철도	재래식 공법
Channel Tunnel	50.45	영국-프랑스	철도	11대의 쉴드 TBM
Lötschberg Base Tunnel	34.58	스위스	철도	경암반 TBM
Guadarrama Tunnel	28.38	스페인	철도	4대의 High-Power, 쉴드 TBM
Hakoda Tunnel	26.46	일본	철도	NATM
Iwate-Ichinoe Tunnel	25.81	일본	철도	NATM
Pajares Base Tunnel (시공 중)	24.67	스페인	철도	10대의 더블 쉴드 및 싱글 쉴드 TBM
Laerdal Tunnel	24.51	노르웨이	도로	NMT(Norwegian Method of Tunnelling)
Iiyama Tunnel (시공 중)	22.23	일본	철도	NATM

스위스 취리히 근교 짐머베르크에서 남쪽 루가노를 연결하는 연장 57.07km의 고타르트 베이스 터널이 세계 최장 터널이며, 특히 상하행선을 병렬터널로 시공하고 있어 총 시공연장은 153.4km에 달한다. 이는 알프스철도(AlpsTransit)의 일환으로 시공 중이며 그림 3과 같이 직경 10m인 4대의 TBM로 굴착이 진행 중이다. 이 TBM은 부속 장비까지 포함할 때 총 길이는 440m이며 총 무게는 3,000톤에 달하고, 최적의 암반조건에서 1일 최대 굴진속도는 25~30m에 달한다. 이 터널공사에서 발생되는 굴착 버력의 양이 이집트 피라미드의 5배에 달하는 엄청난 규모이고, 공사비가 150억 달러에 달하는 초대형 프로젝트이다.



그림 3. 고타르트 터널의 시공 현황

영불 해저터널의 연장은 50km로서 현재 운영 중인 전세계 터널 가운데 세이칸 해저터널 다음으로 두 번째로 긴 터널이다. 하지만 해저구간의 연장은 38km로서 세이칸 터널의 해저구간보다 15km나 길다. 현재 시공 중인 고타르트 베이스 터널이 완공되더라도 세계 3위의 초장대 터널의 명성을 유지하게 된다. 높은 해저 수압과 예기치 못한 지질적인 문제에 대처하기 위하여 그림 4와 같은 쉴드(shield)TBM 11대를 사용하여 1일 굴진속도 75.5m를 기록한 바 있다. 7년의 공사기간 동안 13,000명 이상의 인력이 투입되었으며 총 굴착량은 8백만 m^3 에 달하여 평균적으로 1 시간당 2,400톤의 토사가 배출되었다.



영불 해저터널은 2015년이면 포화상태에 이를 전망으로 새로운 제2의 해저터널이 기존의 터널과 나란히 달리는 자동차 전용터널로 건설될 예정이다.



그림 4. 영불 해저터널에 사용된 TBM

2007년 6월 15일 개통된 뢰치베르크 터널은 스위스 알프스산맥 북쪽 입구의 프루티겐(Frutigen)과 남쪽 입구의 비스프(Visp)를 연결하는 총 연장 35km의 터널로서 현재 세계 최장의 육상 터널이며, 운영 중인 터널 가운데에서는 세이칸 터널과 영불 해저터널에 이어 세계 3번째이고, 시공 중인 터널을 포함하더라도 세계 4번째로 긴 연장의 터널이 된다. 뢰치베르크 터널은 여객열차가 최고 시속 250km로 달릴 수 있게 설계되었고, 초장대터널의 급속시공을 위하여 그림 5와 같은 직경 9.43m의 그리퍼(Gripper) TBM으로 시공하였다. 여기에 사용된 TBM은 숏크리트, 록볼트, 철망 등의 터널 지보재 시공장비가 로보틱스(robotics) 기술에 의해 TBM에 일체화되어 굴착과 동시에 지보재 시공이 가능하게 되어서 기간과 비용을 크게 단축시키는데 기여한 것으로 평가되고 있다.



그림 5. 뢰치베르크 터널에 사용된 TBM

스페인 과다라마 터널은 2002년 스페인 고속철도 확장 계획에 따라 마드리드와 세고비아를 연결하는 노선에 포함되어 있으며 총 연장이 28.38km로서 세계 5위의 초장대 터널이다. 이 터널에는 그림 6과 같은 고성능 쉘드 TBM(High Power TBM) 4대를 투입하여 33개월 만에 총 연장 28km를 고속으로 굴진하였다. TBM 1대당 가격은 약 2천만 달러에 달하지만 월평균 500~600m의 고속굴진에 의한 공사기간 단축뿐만 아니라 종래의 발파공법과 비교하여 환경파괴를 최소화함으로써 인한 이익이 더 크다고 할 수 있다. TBM 전면에 커터 마모와 발생 분진을 최소화하고

원활한 배토에 기여할 수 있는 5개의 화학적 폼(foam) 주입 노즐을 설계하여 적용하였다. 이와 같은 폼 적용으로 인하여 커터 마모율을 15% 감소시킨 것으로 보고되고 있다. 과다라마 터널은 시속 350km의 고속철도 운행이 가능하도록 설계되었다.

스페인에서 시공 중인 총 연장 24.67km의 파자레스 철도터널은 2011년 완공 예정이고, Valladolid와 Gijón을 연결하는 고속철도인 AVE(최고속도 350 km/h) 및 화물열차용으로 운영될 예정이다. 그림 7과 같이 직경 10m의 더블쉴드TBM 및 싱글쉴드TBM이 투입되었으며, 특히 고지압 조건에서 원활한 굴착이 가능하도록 약 400mm 정도 과굴착이 이루어지도록 되어 있다. 프리캐스트 콘크리트 세그먼트의 두께는 500mm로 설계되어 있으며, 터널내 작업공간과 유지시간을 최소화할 수 있는 새로운 버력 처리용 컨베이어 시스템을 적용하고 있다.

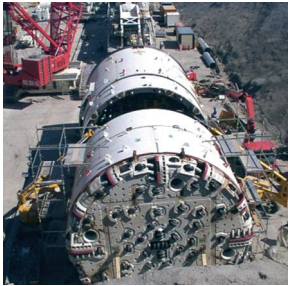


그림 6. 과다라마 터널에 사용된 TBM



그림 7. 파자레스 베이스 터널에 사용된 TBM

이상의 초장대 산악터널 이외에도 21세기의 메가 프로젝트로 고려되고 있는 초장대 해저터널의 건설에도 TBM의 적용이 필수적인 것으로 고려되고 있다. 스페인과 모로코를 연결하는 지브롤터 해협 터널(Gibraltar Strait Tunnel, 연장 38.7km), 러시아 본토와 사할린 섬을 연결하는 타타르 해협 터널(Tatar Strait Tunnel, 연장 11.6km), 러시아와 미국 알래스카를 연결하는 베링해협 터널(Bering Strait Tunnel, 연장 85km), 이탈리아 시칠리아 섬과 튀니지를 연결하는 시칠리 해협 터널(Sicily Channel Tunnel, 연장 136km) 등이 구체적으로 논의되고 있으며 TBM, 특히 쉴드TBM의 적용이 필수적인 것으로 검토되고 있다. 중국 본토와 대만을 연결하는 연장 125~130km의 대만 해협 터널, 연장 120km 이상의 한일 해저터널 등의 시공에도 TBM의 적용이 필수적일 것으로 판단된다. 이상과 같이 도심지에서 친환경적인 터널 건설뿐만 아니라 지역간 또는 국가간 교통 네트워크로서 장대터널의 경제적이고 안전한 시공을 위해 TBM의 적용과 역할이 더욱 중요해졌음을 확인할 수 있다.

3. 도심지 지하도로와 지하철도에서 TBM의 적용

대도시 고속화 지하 교통터널이란 고밀도화된 도시에서 도시 재정비 및 교통량 제어를 목적으로 도심지 하부를 통과하도록 계획된 지하도로를 말하는 것으로서, 지상 토지이용공간의 최적화와 용지보상 및 민원문제 해결 그리고 환경과 도시미관 향상 등이 가능하여 수요가 증가하고 있다. 그러나 대도시 고속화 지하 교통터널은 밀집한 도심부 지하에서 시공되기 때문에 터널 공사에 의한 소음·진동, 침하 등 공사영향의 최소화가 중요하고, 특히 지하철이나 공동구 등과 같은 기존 지하구조물과의 간섭 문제 선결이 요구된다.

도시 고속화 지하 교통터널은 일본 동경도 중앙환상 신주쿠선의 도심지 지하도로용 터널(연장 7km)과 프랑스 파리 A86 동터널(연장 10km) 등을 대표적인 예로 들 수 있다. 이들 지하도로는 직경이 약 13m인 대단면 터널이며, 그 특성상 초장대 터널로 시공되는 것이 일반적이다.

이상과 같이 인구와 도시기능이 집중되는 대도시에서는 교통량의 집중과 정체로 인한 사회비용이 연간 수십조 원



에 달하며, 특히 서울 및 수도권에서는 2002년 기준으로 12.5조원의 비용이 소요되는 것으로 보고되고 있다. 세계적으로도 대도시 교통량을 분산시키기 위해 자동차도로의 경우에는 도심지로 집중되는 교통량의 효율적인 제어가 가능한 환상선과 간선도로 네트워크를 구축하는 형태로 도로정비가 표 2와 같이 진행 중에 있다.^[5]

표 2. 국외의 대표적인 대도시 고속화 지하 교통터널 건설현황

국가	도시
일본	동경, 오사카
프랑스	파리
스웨덴	스톡홀름
중국	베이징
핀란드	헬싱키
영국	런던, 맨체스터
노르웨이	오슬로

반면 국내의 경우, OECD(2005)에 따르면 교통 문제와 관련해 “한국 인구의 절반에 가까운 2천 2백만 명 이상이 수도권에 거주하여 교통 체증과 공기 오염이 수용할 수 없을 정도가 됐다”면서 교통 여건과 비즈니스 시설, 호텔 인프라 등의 개선을 권고한 바 있는데, 이는 도시 경쟁력 저하원인으로 작용하여 수도권 GDP를 3~4% 축소시키는 효과가 있는 것으로 보고되고 있다.

더욱이 지상 가용공간의 과밀화, 용지보상 및 민원문제, 환경과 도시미관의 가치 중시 등에 대한 해결방안으로 대도시 고속화 지하 교통터널에 대한 요구 증대되고 있고, 미국 보스턴의 “Big Dig” 프로젝트에서는 기존의 노후 고가 도로를 철거하고 도시 도로망을 지하화 함에 따라 지상공간을 녹지공간으로 활용하여 시민들에게 쾌적한 도시 환경을 조성하고 있다.

3.1 국내 동향

현재까지 국내의 터널 관련 R&D는 거의 산악지역의 도로·철도터널에 국한되고 있다고 할 수 있고, 실제로 국내에서 현재까지 수행된 도심지 터널 관련 연구는 “지하공동구 내진설계기준 연구”와 “토류벽의 굴착단계별 거동에보 시스템 개발” 등에 불과하다. 따라서 이들 연구들은 대단면·초장대 도심지 터널에 적용하기에는 한계가 있다.^[6]

국내에서도 서울 등을 비롯한 대도시의 지하철 설계·시공 경험과 기술을 가지고 있으나, 고속화 지하 교통터널과 종래의 지하철 구조는 개념과 기술 측면에서 상당한 차이가 있고, 특히 선진외국의 고속화 지하도로에서는 2층 구조의 복층 터널이 설계·시공되고 있으나 국내에서 이와 관련된 기술과 경험이 전무한 상태다.

경제성과 환경피해 최소화 등을 고려하면 국내에서도 향후 복층 터널이 적용될 것으로 기대되는바 이에 대한 연구개발이 필수적으로 요구되며, 중요한 핵심기술인 친환경적이고 경제적인 시공법인 터널 기계화굴착공법의 경우에도 “급속 터널 기계화시공을 위한 최적 굴착설계 모델 개발” 연구를 통해 TBM 커터헤드 설계기술을 연구하였으나, 균질한 암반 조건에만 적용이 가능한 것으로서 도심지에서 빈번하게 나타나는 복잡지반 대응 기술은 여전히 미흡한 상황이다.

이상과 같이, TBM 장비의 설계·제작 기술은 선진기술 대비 매우 미미한 상태로 향후 초장대 터널과 도심지 지하 교통네트워크 건설 프로젝트의 성공적인 완수를 위해 조속히 연구가 추진되어야 할 분야이다.

3.2 선진국 동향

3.2.1 일 본

터널 건설기술의 발달과 더불어 도시미관의 중시, 시공 중 교통 혼잡 방지, 보상비의 최소화 등을 위하여 기존 지상 교통시스템이 지하화되고 있는 추세이다. 대표적인 예로서 일본 동경도의 수도고속 중앙환상도로 신주쿠선, 오사카의 한신고속도로 청천 좌안 선을 들 수 있다. 중앙환상 신주쿠선은 도심에서 8 km 떨어진 지점에 위치하며 총 연장 46km 가운데 동측구간 20km은 이미 운용 중에 있으며, 서측구간(신주쿠선) 11km은 현재 시공 중에 있으며, 사업비는 1조엔 규모이다. 시공은 직경 13.05m의 쉴드TBM에 의해 7km를 시공하며 나머지 4km는 지하 박스(box) 구조로 되어 있다. 쉴드에 의한 기계화시공을 통해 도심지의 기존 도로하부에 터널을 안전 시공하여 지상과 지하공간의 입체적이고 효율적인 활용을 도모하고 있다.

3.2.2 프랑스

프랑스 파리에서는 도심에서 14km 떨어진 외곽의 A86도로에서 총 연장 80km 가운데 10km 구간을 지하도로 시공하였다. 이는 8개의 방사형 도로와 연계되며 10km 구간의 A86 도시고속 환상선(東터널)은 편도 2차로 및 비상차로의 왕복 4차선 터널이며 사업비는 약 10억 유로에 달한다. 특이한 사항은 직경 11.53m의 쉴드 TBM에 의해 소형 자동차 전용도로용 상하 복층터널로 지하 20~90m 심도에서 시공되었다는 점이고, 특히 지하도로와 지상과의 조화에 신경을 써서 지상의 녹지조성, 공기정화, 소음저감 등에 노력을 기울였다.

또한 도로, 지하철, 철도, 주차장 등 모든 교통관련시설은 지하에 설치되고, 그 위에 녹지, 여유 공간 등이 조성된다. 이와 같은 복층구조의 지하도로는 교통효율의 극대화, 파리의 전통인 역사성과 예술성의 강조, 공간 활용도 제고, 개발비용 절감 등을 겨냥한 것이다.

4. TBM의 연구개발 항목

전세계적으로 도로와 철로의 직선화·고속화를 위하여 터널의 수요가 기하급수적으로 증가되고 있고, 이로 인해 터널의 상당수가 장대 또는 초장대화되고 있다. 이러한 상황에서 터널 굴착효율과 환경 및 안전성을 고려하여 기계화 시공인 TBM공법의 수요가 도심지를 위주로 급증하고 있다. 그러나 국내에서 현재 시공 중인 터널의 약 98%에서 재래식 공법인 NATM을 적용하고 있는 상황이다. 특히 TBM 국산장비의 개발에 대한 연구가 전무한 상태로서 이 분야의 기술이 극히 낙후되어 있다.

현재 포화 상태인 서울시의 교통량 해소를 위해서는 지하도로의 건설이 필수 불가결한 상태이고, 이때는 빌딩이나 기존의 지하철로의 아래로 터널을 뚫어야 하기 때문에 화약발파가 이루어지는 NATM을 적용하기에는 한계가 있으며 이로 인해 TBM이 유용한 대안으로 고려된다.

향후 국내 터널 시공방법의 변경과 도심지 지하 교통네트워크 건설의 수요에 대비하고 막대한 외화유출의 방지를 위하여 TBM장비의 연구개발이 요구된다. 그러나 대단면 TBM은 1대 가격이 2~3천만 달러로 매우 고가이다. 그림 8은 스페인 마드리드에 적용된 현재까지 세계 최대 토크사양인 쉴드TBM의 사례로서 장비 무게는 약 300톤이며, 길이는 440m 수준에 달하는 초대형 시스템이고, 회전력(rotation torque) 또한 그림 8과 같이 점보여객기를 들어 올릴 수 있는 수준으로 현재 설치된 기계 중 세계 최대인 약 126,000 kN·m이다. 또한 최근에는 슛크리트, 록볼트, 철망 등의 터널 지보재 시공 장비가 로보틱스(robotics) 기술에 의해 TBM에 일체화돼 복합기술화 되어가고 있다.^[7~8]

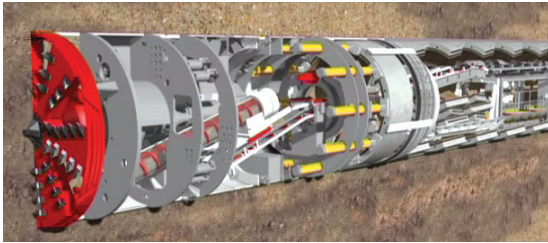
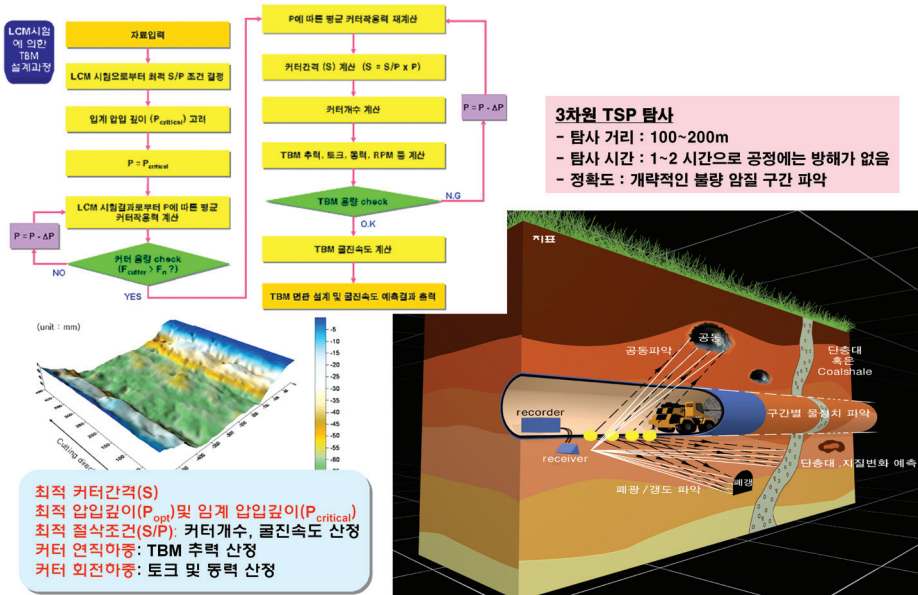


그림 8. 현재까지 전세계에 적용된 TBM중 토크사양이 가장 큰 TBM(마드리드에 적용)

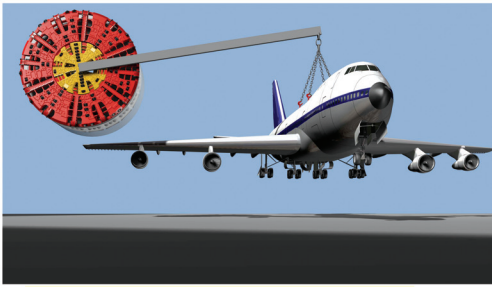
TBM의 연구개발 항목은 “초대형 기계시스템의 엔지니어링기술개발”과 “핵심 요소기술 개발” 그리고 “터널 굴착 기술 개발” 및 “TBM 시스템 기술 개발”로 다음과 같이 나눌 수 있다.



○ TBM 터널굴착 기술 개발



○ TBM 시스템 기술 개발

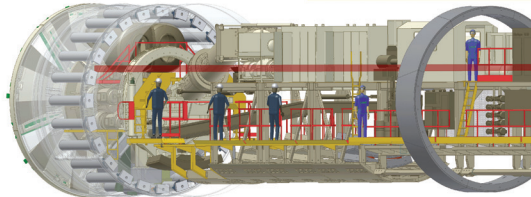
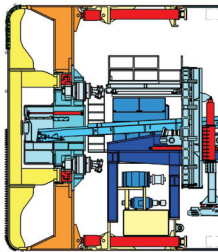


Highest torque ever installed in a Machine.
125,268 kNm, EPB-Shield M-30 Madrid.

- 고 토크 헤드 Driving System 기술
- 굴진 Mechanism/Hydraulic System 기술
- 버력 및 토사 이송시스템 기술
- 지보재 설치 및 스크립트 설치 기술
- Shield system 기술



- Diameter: 15,200 mm
- Cutter head Power: 12 MW



5. 결 론

국내외에서 시공 또는 계획되고 있는 TBM터널 사례들을 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 도심지를 중심으로 친환경적이고 경제적인 터널건설을 위하여 TBM의 적용사례가 급증하고 있으며, 최근 들어 제한된 국토의 효율적인 활용을 위하여 토지보상비와 민원 등을 최소화할 수 있는 대심도 지하도로 및 지하철도가 건설 또는 계획되고 있다.
- 장대 산악터널에서도 공사기간과 공사비용 절감을 위하여 고속 터널굴착 기술이 요구되고 있으며, TBM이 그 대안으로서 고려되고 있다.
- 현재 국내에서는 대부분의 터널공사가 채래식 공법으로 이루어지고 있으나, 전 세계적인 녹색성장에 부합하고 터널공사의 경제성 향상을 위하여 빠른 시일 내에 기계화 터널공법인 TBM으로의 전환이 시급한 것으로 사료된다. 향후 국내의 수요충족과 해외시장 진출을 위해서는 TBM 국산화 기술 개발이 매우 시급한 상황으로서 정부 차원의 정책적 지원이 요구된다.

❁ 참고 문헌

- [1] 노상림, 노승환, 이상필, 서정우 “대단면 터널에서의 최적 발파 굴진 시스템 개발”, 터널공학회. 2004.
- [2] Soo-Ho Chang, State-of-the-arts and Perspectives of TBMs in Korea and Overseas. KTA Symposium, 2008.
- [3] Guglielmetti, V., Mahtab, A., Xu, S. and Grasso, “Mechanized Tunnelling in Urban Areas”, Taylor & Francis, London, United Kingdom, 2007.



- [4] 배규진, “TBM의 현황과 미래 전망”, 제3차 터널기술강좌-터널 기계화시공(설계편), pp. 1~53, 2008.
- [5] GS건설, “미래형 지하공간 사업전략 수립 연구보고서”, 2006.
- [6] 한국건설기술연구원, “미래형 신공간/인프라 창출을 위한 지반기술의 신개념 활용 방안기획연구보고서”(1단계: 지하공간 분야), 2006.
- [7] Bernhard Maidl, Martin Herrenknecht, Lothar Anheuser, “Mechanised Shield Tunnelling”, [주] 특수건설, 2001, pp. 61~336.
- [8] B. Maidl, L. Schmid, W. Ritz, M. Herrenknecht, “Tunnelbohrmaschinen im Hartgestein”, Ernst & Sohn, 2001, pp. 37~432.



장 수 호

· 한국건설기술연구원 지반연구실 책임연구원
 · 관심분야 : 터널/지하공간, TBM, 건설기계
 · E-mail : sooho@kict.re.kr



이 용 범

· 한국기계연구원 시스템신뢰성연구실 책임연구원
 · 관심분야 : 유압시스템, 건설기계
 · E-mail : lyb662@kimm.re.kr