

한국 터널기계화 시공기술의 현황 및 전망



지왕불
태조엔지니어링
TBM사업부 사장



박진수
태조엔지니어링
TBM사업부 이사

1. 서론

국내의 터널 기계화 시공 기술은 앞으로 어떤 방향으로 발전할 것인가?

근래에 Modern High-Power TBM의 등장은 세계최장의 57.07km인 스위스 Gottard Base 철도터널을 비롯해, 한반도 간에 경암용 Double Shield TBM을 적용한 28.38km의 스페인 Guadarrama 고속철도터널, 그리고 직경 19m가 넘는 단

면계획으로 3차로 복층터널을 계획 중인 러시아의 Orlovski 도로터널 등을 시공했거나 시공 중에 있다.

빠르고, 안전하고, 대형화되고 있는 Modern High-Power TBM은 기존 터널 굴착에 사용했던 NATM공법이 수행하기 어려운 도심지, 해·하저, 초장대터널에서 대단한 활약을 보여주며 멈추지 않는 진화를 계속하고 있다.

본 고에서는 현재 국내·외 기계화 시공기술의 현황을 알아보고, 이에 대한 발전적인 방향을 제안 하고자 한다.

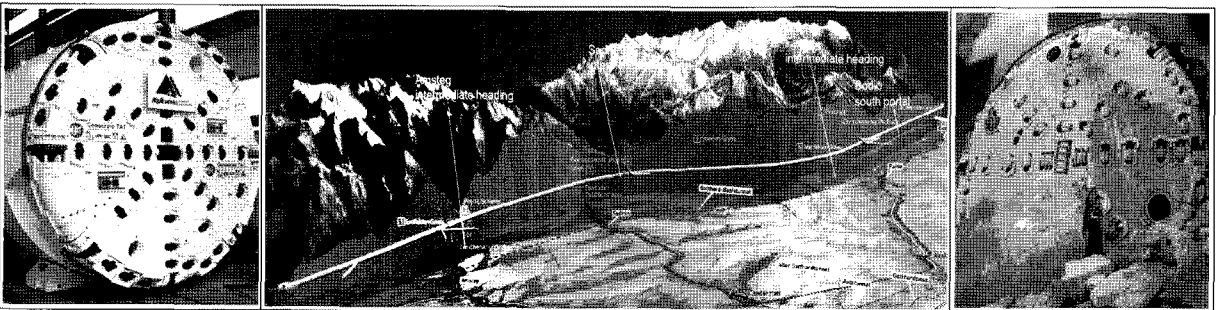


그림 1. 57.07km의 세계최장 Gottard Base 터널에 적용된 Hard Rock TBM(스위스)

2. TBM 공법의 과거와 현재

터널굴착공사에서 기계장비의 도입은 터널 굴진율의 향상과 더불어 지하구조물을 안전하게 시공 하는데 큰 역할을 하여 왔다.

과거 200년 동안 터널 굴착의 양대기술은 Drill & Blast 를 이용한 발파공법과 TBM등을 이용한 비 발파 순수 기계식 굴착공법인, 기계굴착(Bore)공법으로 분류하고 있다.

스웨덴의 Nobel이 다이내마이트를 발명한 이후 폭약은 터널굴착에 있어서 획기적인 역할을 하였고, 이에 필요한 착암기의 개발로부터 점보드릴에 이르기까지 천공굴착기술의 발전이 있었고, 버력처리를 위한 로터장비 등의 개발로 터널 굴착 굴진율에도 큰 발전이 있어왔다.

약 200년전, 나폴레옹시대 Euro터널 건설 방안으로 프랑스의 광산기술자가 최초로 TBM 장비를 제안한 이후, 근대 TBM장비는 미국의 유명한 광산기술자인 James. Robbins 에 의해서 발전해 왔으며, 공사중 터널내부를 보호하는 Shield는 영국의 토목공학자인 Brunel이 개발했다.⁸⁾

오늘날에는 독일의 Dr. Herrenknecht 같은 기계전문가가 합류하여 유압장비인 High-Power Modern TBM의 개발이 가능하게 되었다.(그림 2,3,4 참조)

세계적으로 터널 선진기술을 지닌 유럽의 터널현장에서 Euro-Tunnel의 시공으로 인하여 터널의 기계화 시공이 활성화 되었다. 또한 프랑스, 독일, 스페인, 이탈리아, 스위스 등지에서 고속철도 건설 프로젝트를 시행하면서 높은 산악지 밑을 통과하는 장대 터널을 TBM으로 설계함으로써 공기문제를 해결하여, 고속굴진 High-Power TBM의 사용이 본격화 되었다.

TBM의 발전은 기존의 Drill & Blast(NATM) 공법의 문제점을 개선하여, 특히 3km이상 장대터널의 경우 경제성에 있어서도 Drill & Blast 공법보다 경쟁력이 있음이 증명되었고¹⁾, 기존의 Drill & Blast 공법, Umbrella 공법으로도 시공이 어려운 토사 등 연약지반의 경우도 토사 Shield TBM이 개발되어 도심지 지하철 터널 등에 사용되고 있는 실정이다.

중국의 경우 연장이 2km가 넘는 산악터널, 해저, 하저,

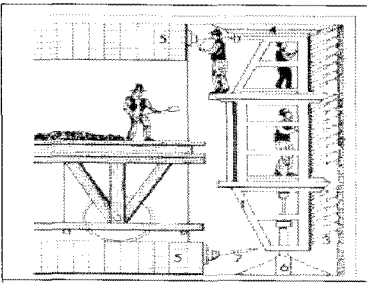


그림 2. 인력굴착에 의한 Brunel의 철제Shield (1918년)와 Marc Brunel(토목공학자)

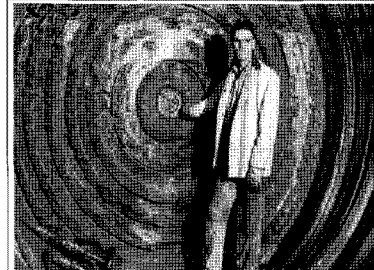
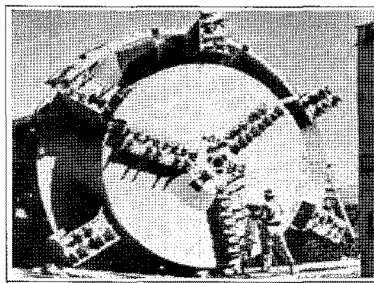


그림 3. Robbins사의 세계최초 임반용TBM(1956년)과 James Robbins(광산공학자)

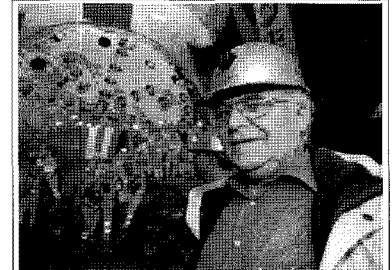
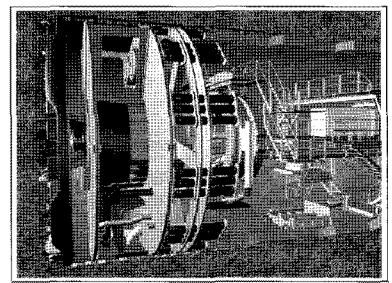


그림 4. Herrenknechts사의 Modern TBM(2000년)과 Martin Herrenknecht(기계공학자)

특히 도심지 지하철 터널 등에는 대구경 TBM을 사용하는 것이 이미 10년 전부터 보편화되어 있으며, 중국 자체 Brand로 TBM 장비를 제작하고 있다. 중국의 북방중공업은 프랑스의 NFM을 합병하여 직경 13m 이상의 TBM을 15대 동시 조립할 수 있는 공장설비를 심양에 보유하고 있다. (그림 5, 표 1 참조)

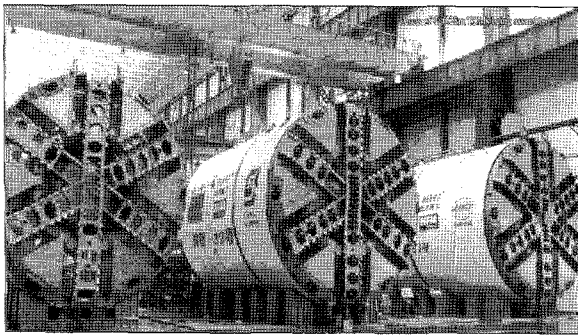


그림 5. 중국 북방중공업 TBM 제작공장

이에 비하여 조선, 기계, 건설장비 등 중공업 선진국인 우리나라는 아직도 대구경 교통터널(Traffic Tunnel) 사업에 있어서, 재래식 굴착공법인 발파공법을 주로 사용하고 있다. 하지만 1인당 GDP 20,000\$시대를 넘어서 선진국 문턱에 들어선 한국의 Tunnel Engineer 입장에서 볼 때, 오늘날 터널의 기계화 시공은 터널산업 Trend의 변화를 위한 매우 중요한 전환점이라 판단된다.

향상된 생활수준으로 3D 업종인 발파시공 지하 터널 현장에 한국인 기술자, 기능인의 기피현상으로 제3국의

무자격 기능, 기술자들이 투입되고 있으며, 이로 인해 터널의 안전시공, 시공효율성 등에서 많은 문제점을 보이고 있고, 민주화된 오늘날 시민들의 친환경 녹색성장에 대한 인식, 도심지에서 조용하고 안전한 시공법을 선호 하는 등 공사현장에 대한 인식향상으로 사실상 국내 도심지에서도 발파공법 적용이 거의 불가능 한 편이다.

세계적으로도 대구경 교통터널(Traffic Tunnel)의 사용비율이 증가하여 지금은 대체를 이루고 있으며, 30년전에 3~4군데에 불과했던 TBM제작사는 이제는 14업체 이상의 업체군을 이루고 있다. (표 2 참조)

또한, 대구경 TBM장비 가격도 과거에 비해 거의 50% 수준으로 떨어져, 대구경 TBM이 교통 터널에서 보편적인 주요 장비로 일반화 되어 가는 것이 세계적인 추세이다.

이러한 여러 가지 세계적인 정황을 파악할 때 국내의 건설업체도 국내에서의 대구경 TBM공사에 대한 실적을 쌓아야 세계적으로 공사 물량이 증대하고 있는 Global TBM공사 시장에 도전할 수 있을 것이다. 사실 TBM 터널 공사만큼 국제화하기 쉬운 것도 없다. TBM장비를 가지고 국내에서 터널을 시공하거나, 바닷속에서 시공하거나, 미국에서 시공하거나 모두 같은 시공 공정(Process)을 갖고 있어 시공사가 얼마든지 국제화 시킬 수 있는 사업시장이다. 건설과 중공업분야에서 이미 선진국 수준에 도달한 한국의 터널시장도 Modern High-Power TBM의 도입을 통해 새로운 국내·외 시장 개척이 가능할 것으로 생각되며, 장차 젊은 국내 터널기술자들의 미래를 보장하여 줄 중요한 일자리 창출이라 판단된다.

표 1. 중국 TBM 발전 현황⁵⁾

년도	발전 내용
1966년	중국 최초 전단면 Open TBM제작(직경 3.5m, Xiehe 수력발전소 문수로터널 건설)
1987년	중국 최초의 토압식 Shield TBM 개발성공(직경 4.3m, 상하이 하저통신구 건설)
1990년	프랑스 FCB사와 Shanghai Tunnel Engineering사와 공동으로 7대의 토압식 Shield 제작(직경 6.34m, 상하이 지하철 건설)
1999년	프랑스 FMT사와 Shanhai Heavy Machinery Plant가 TBM 제작(직경 8.75m)

표 2. 세계 주요 TBM제작사 현황⁶⁾

국가	업체명	현황 (설립연도, 특징)
독일	HERRENKNECHT	1975년, 전세계 TBM시장 50% 점유하는 최대 규모 제작사
	WIRTH	1895년, 1967년부터 TBM장비 제작
미국	ROBBINS	1952년, 1952년 경암용 Open TBM에서 디스크커터 최초사용
	AKKERMAN	1973년, Semi-Shield 등 소형 TBM장비 전문제작사
캐나다	CATERPILLAR(LOVAT)	1972년, $\phi 3m \sim \phi 12m$ 장비 제작가능
이탈리아	SELI	1950년, 1992년부터 TBM장비 제작
호주	TERRATEC	1990년, RBM을 비롯 TBM장비 전문 제작사
중국	NFM(NHI)	1988년, Mitsubishi 기술지원/2001년부터 TBM 독자생산
	Shanghai TEC	1990년, 상하이 지하철 $\phi 6.34m$ TBM 제작 시작
일본	KAWASAKI	1878년, 1991년 영률해저터널 Shield TBM 제작사
	MITSUBISHI	1934년, 현재까지 1700여대 TBM장비 제작
	HITACHI	1881년, 1967년부터 TBM장비 제작
	KOMATSU	1921년, 1963년 일본최초의 TBM 생산
	OKUMURA	1907년, 중저가 Shield TBM 제작 및 시공사

3. 현대 암반용 TBM의 개발 현황

경암용 TBM의 개발은 지난 10년간 엄청난 발전을 거듭해 왔다.

첫째, 커터재료의 연구개발로 인해 초경합금 등으로 경화된 커터 개발로 극경암반에서 굴진을 저하를 보이던 문제도 많이 극복되었다.(그림 6, 표 3 참조)

둘째, TBM Main Drive의 Power 부족으로 작은 단면에 한하던 TBM 터널굴착이 현재는 미국 Seattle Alaskan way는 직경 $\phi 17.7m$ ¹⁰⁾, 러시아 St. Petersburg Orlovski 도로 Tunnel 사업에 직경 $\phi 19m$ ⁴⁾ 정도의 대구경 TBM장비를 도입 할 정도로 TBM Main Drive의 Power가 향상되어 웬만한 교통 터널의 경우 대단면 굴착이 가능하게 되었다. (그림 7, 8 참조)

셋째, 운행 속도가 3m/sec를 넘는 고속 장대 벨트컨베이어의 개발로 장대터널에서의 대량버력 처리의 고속처리

가 가능해져서, 장대터널 시공 시 굴진속도에 장애가 되었

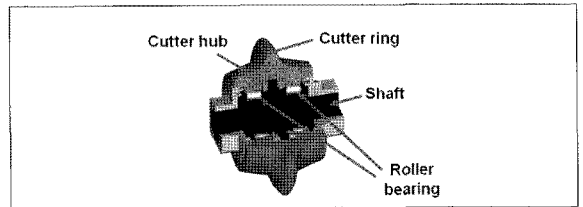


그림 6. 디스크 커터의 구성⁸⁾

표 3. 디스크커터크기와 최대허용하중과의 관계⁸⁾

디스크 커터 크기(inches)	15.5	17	19
최대 허용 하중(tonf)	22	25	32

던 버력처리가 원활하게 되어, 고속 굴진이 가능하게 되었다. (그림 9 참조)

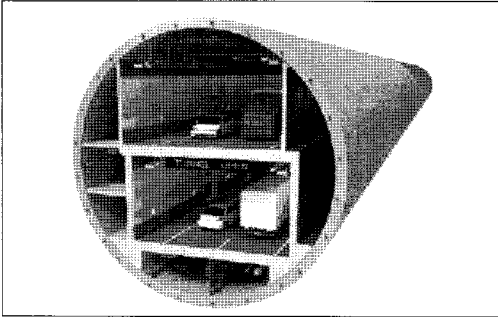


그림 7. 미국 Seattle Alaskan way¹⁰⁾

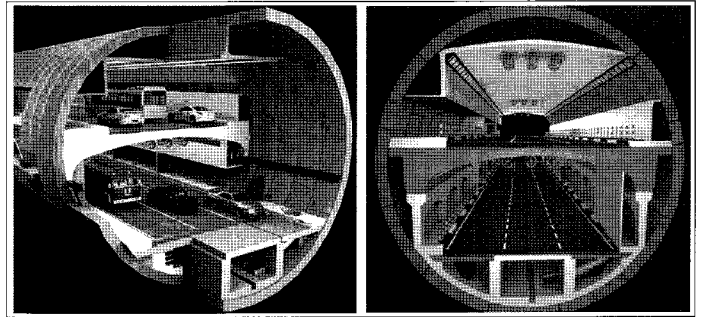


그림 8. 러시아 St. Petersburg Orlovski터널⁴⁾

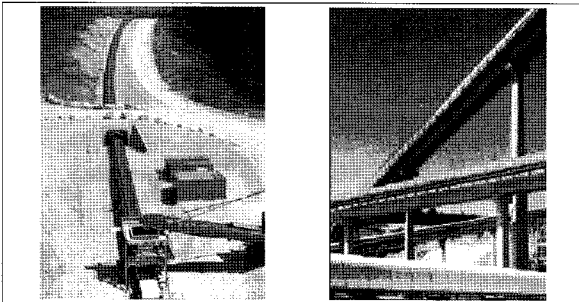


그림 9. 독일 함부르크 플랜트 현장적용 예

Conveyor System	
Conveying Capacity	1,200t/h
Conveying Speed	3.1m/s
Belt Width	1,200mm
Length	1,100m
Drive Capacity	2x110kW

넷째, 과거 터널내 단층대 및 지질이상대 등에서 갑작스런 붕락으로 TBM 장비보호와 운전자의 안전에 문제를 야기시켰던 개방형 Open TBM은 막장 밀폐형 Shield TBM으로 구조를 변경한, Hard Rock Shield TBM이 개발되었다. Hard Rock Shield TBM은 지반이 불량해지거나 갑작스런 지하수 유입량 증가에 따른 터널내 안정성 확보, 장비보호 및 난구간 공사를 가능케 하고 있다. 그림 10은 스페인의

마드리드에서 세고비아까지 총연장 28.38km 고속철도 터널건설공사에서 우리나라 지반조건과 유사한 경암, 화강암 및 편마암으로 구성된 지질조건을 Hard Rock Double Shield TBM으로 적용하여 월평균 굴진율 500~600m/month로 통과하여 장대터널의 공기문제를 High -Power TBM으로 해결한 과다라마(Guadarrama)터널의 사례이다.⁹⁾ (그림 10 참조)

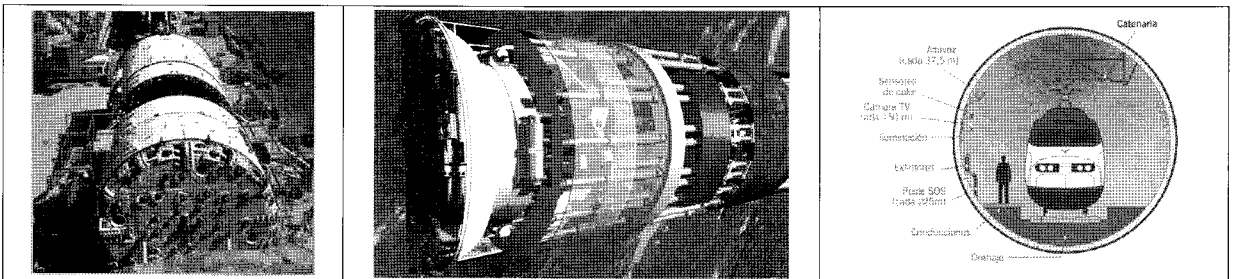


그림 10. 과다라마(Guadarrama)터널에 적용된 암반용 Hard Rock Double Shield TBM⁹⁾

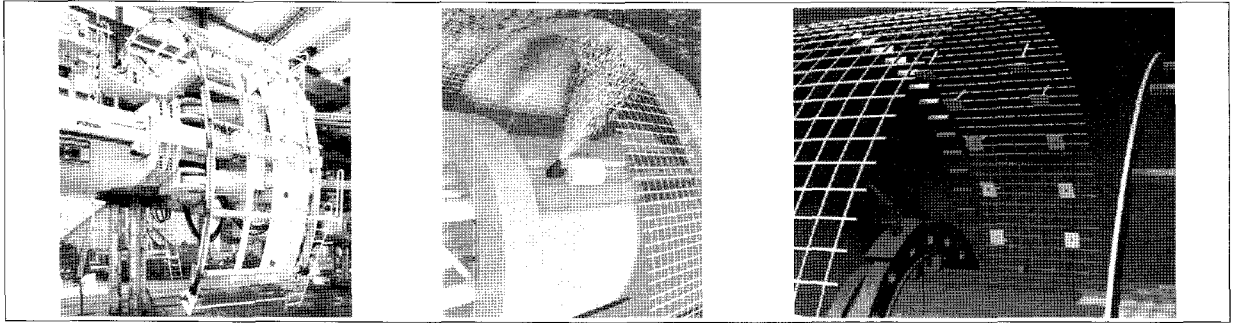


그림 11. Gripper TBM의 지보재 설치의 전자동화 및 로봇화

또한, Shield의 적용은 PC Segment의 지보재 적용이 가능해져, 지보재 설치에 있어서도 과거에 비해 훨씬 신속하게 이루어지고 지보재의 품질도 개량되어서 TBM 기술 발전에 큰 역할을 하였다. (그림 11 참조)

결론적으로 정리하자면 압축강도 400MPa의 극경압도 절삭할 수 있는 커터의 개발 및 현장적용⁷⁾, 커터의 성능을 극대화할 수 있는 Power Drive Motor의 개발, 굴착 반발력을 잡아주는 대구경 Main Bearing의 제작, 장비를 보호하는 Shield TBM의 암반 터널 적용, 고속 버력 처리 장비의 개발과 빠른 고강도 Segment 지보재의 설치 기술은 굴진 고속화라는 Modern TBM 터널 기술의 염원을 성취해 주고 있다.

하지만, 암반용 TBM 굴진 시 발생할 수 있는 문제점과 향후 개선 과제도 있다. 단층대 및 지질이상대 등 암질이

불량해서, 그라우팅 등 선 지반 보강을 해야 하는 경우, 지하수의 유입이 심해서 차수대책을 수립해야 하는 경우, 또한 하향 굴진 시 배수 문제 등은 아직도 장비의 가동율을 떨어뜨리는 기본적인 문제들로서 앞으로도 계속 풀어나가야 할 숙제이다. 또 다른 문제로는 파쇄대 등에서 TBM 장비만 통과 될 정도의 최소화 보강 공법의 적용으로 발파공법에 비해 우수한 기술적 장점을 갖고 있으나, 굴진면 막장 전방의 지층상태에 대한 탐사 분석기술이 부족하여, 예기치 못한 지층상태를 만나면 대책수립에 많은 시간이 필요하게 된다.

다음은 커터 교체에 관한 문제이다. 경암용 TBM은 커터의 교체가 잦은 편으로 장비의 Down Time에 많은 부분을 차지하고 있어 커터의 사용주기가 긴 대구경 커터인 직경 20inch가 등장하였고, 경암용 커터도 고효율 커터

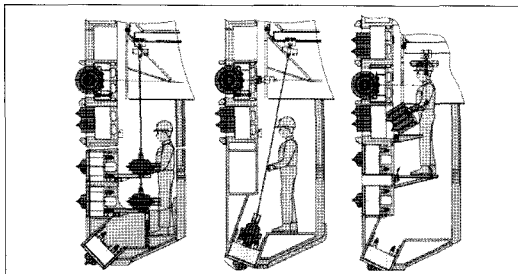


그림 12. Gottard Base 터널에 쓰였던 커터교체방식 (Herrenknecht, 독일)

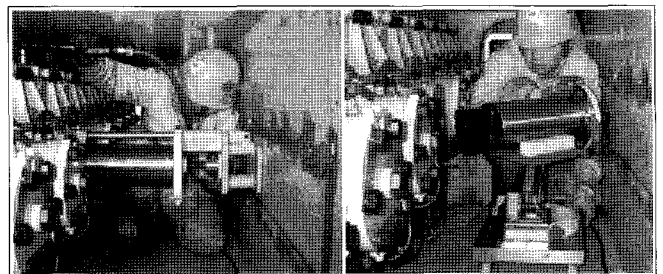


그림 13. 커터비트 자동교체장치 (Kawasaki, 일본)

로 개발되고 있다.

일반적으로 대구경 커터가 무겁고(약 150~250kg/EA), 커터가 커터 하우징에 Bolt로 연결되어 있어, 커터 교환 시 커터의 분리가 어려운 실정이다. 또한, 커터가 무겁다 보니, 막장으로 운반하는 것도 쉬운 일이 아니고, 하여 기존의 막장에서 커터를 교체하는 Front Loading 방식에서 장비 내부에서 커터를 교환할 수 있는 Back Loading 시스템으로 개발된 상황이나, 아직도 커터의 하우징내 체결 방식에 대해서는 많은 연구가 필요할 것이다. (그림 12,13 참조). 커터의 체결과 분리가 쉬운 방식의 개발과, 커터의 하중을 경량화 시킬 수 있는 재질의 개선과, 굴착 시 커터의 적정 교체시기를 판단할 수 있는 커터의 상시 온도와 진동계수를 측정할 Sensor System의 개발이 절실한 상태이다.

커터에 대한 또 다른 차후 과제는 경암지대와 연암지대를 동시에 굴삭이 가능한 복합지반용 다목적 커터의 개발이 필요한 것이다. 현재 기술적으로 경암용 커터는 Brittle 하여 연암 등 파쇄대에서 쉽게 파손되며, 연암용 Bite Bit는 경암을 굴삭하게 되면 쉽게 마모되어 파손되는 단점을 갖고 있어, 복합지반에 대해서는 커터 헤드의 커터 Design을 경암용, 연암용을 혼합하여 Design하고 있으며, 복합지반용 커터의 개발은 앞으로 해결해야 할 중요한 사항이다.

경암구간 TBM 굴착 시 가장 큰 문제는 복합지반을 만나 지반이 연약해 질 경우 TBM운전에 어려움이 생길 수 있다. 장비가 균형을 잃을 수 있고, 지반이 너무 연약한 곳에서는 장비가 하향 침하할 위험도 있다. 산악 터널에서 TBM 굴착 시공 시에는 터널의 토피가 어느 정도 일정하게 유지되는 동시에 지층의 변화가 심하게 나타나지 않아 일정한 굴진율을 확보 할 수 있지만, 계곡, 강 등 지질학적 구조대나, 천층 연약지반 통과 시에는 장비 운용에 문제점이 발생할 수 있으므로 주의하여야 한다.

4. 국내 토사용 TBM의 적용 현황

토사용 Shield TBM은 지반이 연약한 일본에서 개발되었으나, 최근에는 전 세계적으로 제작되어지고 있다. 근본적으로 단단한 기반암이 널리 발달한 국내에는 토사용 Shield TBM은 적용성이 떨어지는 장비이나, 지리적으로 가까운 일본 TBM업체의 저가 공세로 인해 국내 터널 현장에도 적지 않게 투입되어 있는 상황이다. 이러한 이유로 국내 Shield 기술은 일본 기술에 의존도가 높은 것이 사실이나, 경암용 Shield TBM 기술은 일본도 독일과 미국의 기술력에 의존하고 있다. 향후 터널 노선이 대심도화 되면 토사용 TBM의 국내 활용도는 많이 줄어들게 될 장비 타입이다. 그림 14,15는 대표적인 연약지반용 Shield TBM의 예이다.

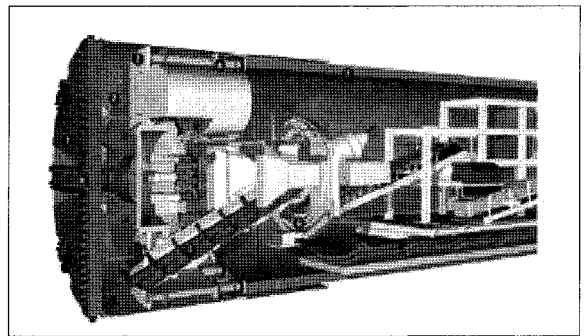


그림 14. 토압식(EPB Type) Shield TBM

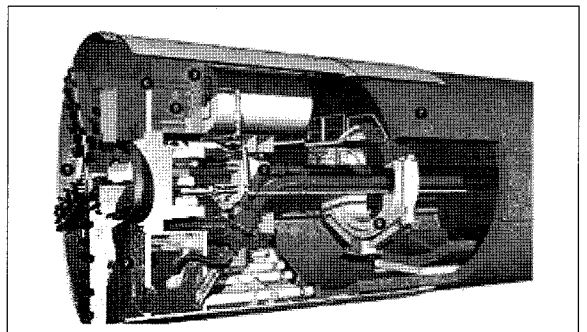


그림 15. 이수식(Slurry Type) Shield TBM

4.1 국내 토사 Shield TBM의 적용 사례

국내의 토사 전용 Shield TBM의 적용은 도심지 지하철 터널에서 이루어졌고, 광주 도시철도 1호선은 연약지반으로 EPB Shield TBM으로 설계되었으나, 노선상의 실제 지반은 복합지반으로 터널 노선 중간에 암반층이 출현하는 바람에, 커터의 마모가 심하게 되어 경암구간은 발파공법으로 공법을 변경하여 굴착하는 등, 어려운 작업을 하였다. (그림 16,17 참조)

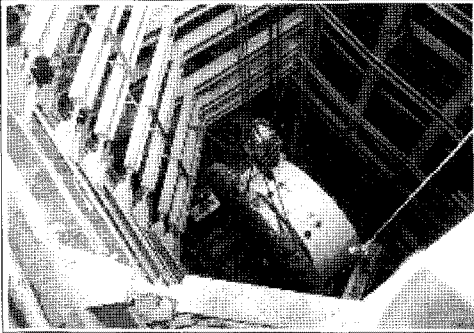


그림 16. 광주지하철에 투입된 TBM 헤드부분

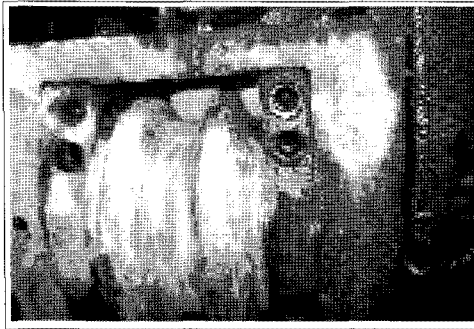


그림 17. 암반대응형 커터 미고려로 인한 커터 손상

부산지하철 230공구 수영강 통과 구간은 커터의 선정, 커터헤드의 설계 오류, 예상치 못한 암반구간의 출현 등으로, 커터마모가 심하여, 커터헤드의 Main bearing까지 손상되어 막장이 무려 17번이나 장비 운전 정지로 인해 공사에 큰 피해를 본 바가 있다. (그림 18,19 참조)

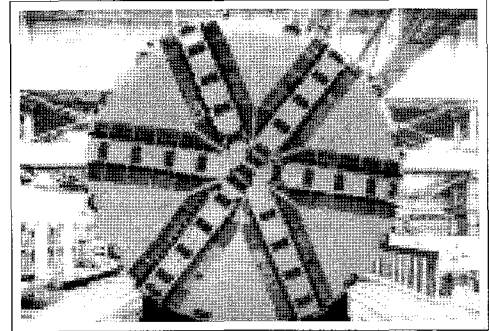


그림 18. 부산지하철에 투입된 TBM

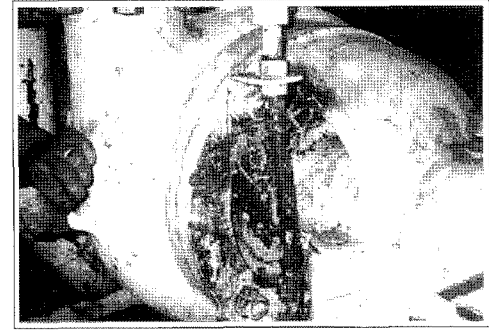


그림 19. 배니펌프 폐색현상 발생 및 디스크커터 탈락

비교적 성공적인 프로젝트인 서울 지하철 9호선 9-9공구 여의도 국회 의사당 하부 통과 구간은 충적층인 모래·자갈 지반으로 토사 TBM 적용이 가능한 이유로 Slurry Shield TBM으로 설계되었다. 현장의 지반 조건이 대부분 연약 지층인 모래·자갈층으로 적정장비의 선정으로 큰 문제 없이 굴착되어 일일 굴진율을 최대 16m/day까지 이른 바 있다.

토사 Shield TBM 터널 설계시 가장 우려되는 사항은 복합지반으로 암선이 올라와 설계시 보다 강한 암층을 통과해야 하는 경우와 연약지층 내 호박돌(Boulder)의 출현으로 장비이동이 어려운 경우로 특히 호박돌의 처리에 많은 시간과 공사비가 소요된다. 물론 사전에 호박돌의 존재를 파악했다면, 여러 가지 다양한 해결책으로 그 문제구간 통과가 가능하지만, 전혀 예측하지 못한 경우는 호박돌 처

리에 큰 어려움을 겪게 된다. (그림 20 참조)

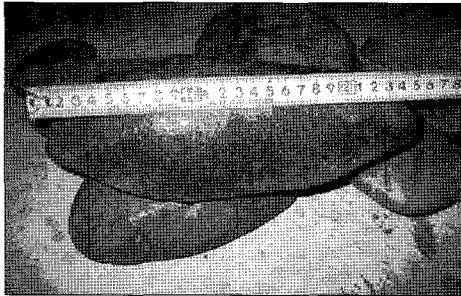


그림 20. 굴진중 호박들 출현(서울지하철 909공구)

토사 Shield TBM 시공시 주의해야 하는 또 다른 경우는 지하수위가 높아서 버력과 함께 지하수가 막장으로 들어오는 경우이다. 장비 내 차수시스템 등 갖춰진 적절한 용수 대책이 없으면, 도심지 굴착 시 환경문제를 비롯한 버력의 운반 등 여러 가지 문제가 발생한다.

분당선 한강 하저 터널공사의 경우 전형적인 토사 Shield TBM인 EPB TBM(Komatsu, 일본)이 도입되었으나, 불행하게도 터널구간이 거의 경암반 구간이어서, 터널굴진에 큰 어려움을 겪은 바 있다. 차후 암반구간인 본 공사에 암반용 국산 19inch 대형 디스크커터로 변경 사용하였다. (그림 21 참조).



그림 21. 분당선 한강 하저터널 공사중 교체된 19inch 트윈커터

그 외에도, EPB TBM 장비사양에 대한 명확한 설계 내용이 없고, 커터 하우징에 암반굴착시 마찰열을 냉각시켜주

고, 커터로 인해서 발생하는 분진발생을 억제해 주는 Water Spray에 대한 장치가 빠져 있었다.

또한, 장비 자중이 경암반을 굴착하는 것에 비하여 너무 경량이며, 굴착 시 막장면을 지지할 추력과 막장면 커터헤드 면판을 회전시킬 구동 파워도 부족했다. 이런 TBM 설계에 대한 중요한 내용이 설계 시 생략되어 있었다.

분당선 한강 하저 터널공사에서는 장비 설계 못지않게 중요한 Procurement Service에 대한 부분도 누락되었다. 적정장비의 자중, Installed Power, 커터선정 등과 같은 장비의 사양 결정, 장비 구매사항 등 중요한 전문적인 항목들이 검토되지 않았다. 이러한 경우, 만약 실제 터널 막장에서 설계 시 예상한 것 보다, 강한 압반을 만나게 되면 연약지반용 커터는 마모율이 커지고, 커터헤드 Drive에 부담을 주게 되어, 공사 중 커터헤드의 Main Bearing이 손상된다면, 30억원 이상의 교체비용이 소모되고, 막장은 최소 3달 정도 작업 중지 상태가 되는 최악의 상황이 발생할 수도 있다.

결국, 분당선 한강 하저 터널공사는 TBM공법을 적용하여 하저구간을 안전하게 관통하였음에도 불구하고, 설계 당시의 예상 굴진율에 크게 미치지 못하였고, 낮은 굴진율로 인하여 공사 실행에 많은 부담을 주었다. 굴착을 마친 TBM장비는 보수하여 재활용할 염두조차 내지 못하고 바로 고철 처분하였다.

TBM 장비설계, TBM 조달서비스에 대한 Consultant의 역할 부족과 책임소재에 대한 업무 분장의 범위마저 명확치 않아 결국 현장 시공기술자들을 비롯해 많은 사람들이 고생 하였다.

5. Cost vs Distance(터널공법 선정기준에 중요한 연장별 터널 공사비 분석)

TBM 공법 적용에 대한 국내 기준이 명확하지 않아서 발주처나, 시공사, 설계기술자 등 많은 혼란이 가중되고 있

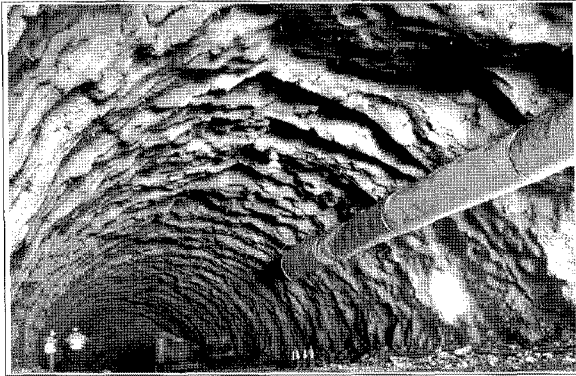


그림 22. 일반적인 NATM 시공 현황

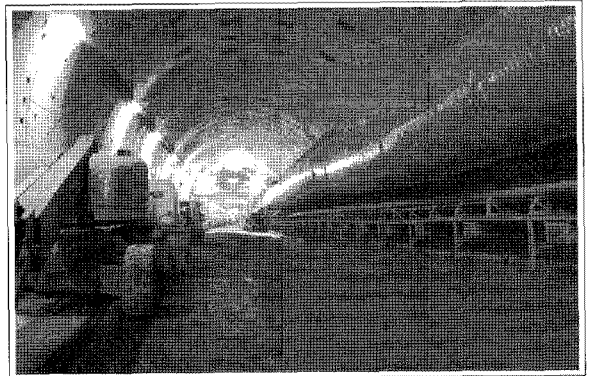


그림 23. 일반적인 TBM 시공 현황

는 형편이다. 또한, 공사비, 공사기간 등에 있어서도 국내 PQ 자료를 요구하는 경우도 많은데, 현실적으로 대구경의 경우 국내에 시공 실적이 없으므로, 쉽지 않은 일이다. 중국과 러시아는 TBM을 일반화된 터널공법으로 적용하는 나라들인데, 통상 터널의 연장이 2km이상이면 TBM공법이 NATM공법보다 경제성에서 유리하다는 실행 기준을 가지고 있다. 하지만, 우리나라 도로터널의 경우는 최근에 발주된 연장이 11km가 넘는 인제 도로터널, 연장이 7.5km가 넘는 양남터널도 NATM공법으로 설계되었다. 최근 관심을 모았던 보령-태안 1공구 건설공사에서 연장이 약 8km인 해저 도로터널도 NATM공법이 선정되었고, 하저 구간인 서울시 강변 북로 확장공사 텀키도 NATM공법이 선정되었지만, 하·해저 구간의 공사 중 해수유입 시 안전문제가 해결이 안되어 발파공법 적용이 쉽지않고, 노선이 도심지 통과에 따른 민원문제 발생 등 도심지에서의 발파공사가 수월치 않은 현실이다. 또한, 최근의 부산의 광산환 고속도로 9공구 대안설계구간 연장 7.2km 쌍굴 터널도 원안설계와 같은 공법인 NATM공법을 적용하였다. 그림 22,23은 공법별 일반적인 시공 현황 모습이다.

세계적인 터널 컬럼리스트인 Mourice Jones가 쓴, Tunnel & Tunnelling Journal의 Choices of Excavation 기고문을 보면(2011년, 5월) '연장이 3km 이상의 터널은 TBM 공법이 경제적이다.' 라고 기술하고 있다.¹⁾

(그림 24 참조).

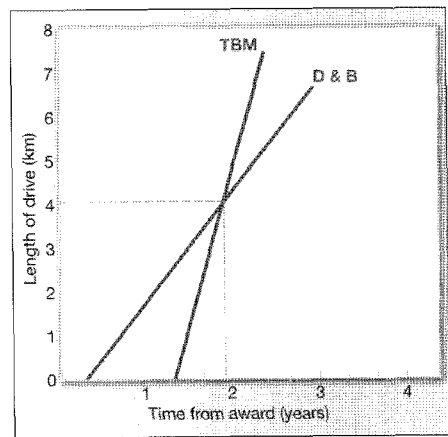


그림 24. 터널연장에 따른 공사기간²⁾

NATM공법의 경우 국내에 많은 시공 경험을 갖고 있으며, 현장 시공 실행 또한 회사 마다 다양한 Know-How를 보유하고 있고, 전문 하도급업체도 국내에 많이 존재한다. 따라서 대형 시공사 전적팀은 공사비에서 조금 더 자유로운 편이고, 능숙한 NATM 터널공사비 산정이 가능하다.

그러나 대구경 TBM공사는 국내의 어떤 시공사도 견적에 있어 자유롭지 못하다. 기술력, 경험부족 등이 그 이유인데, 전문업체의 견적 자체가 외국전문 시공사와 달리 시

공 경험이 없어, 원천적으로 시공 리스크를 많이 포함하고 있다.

국내 철도터널의 경우 TBM 공사비가 NATM 보다 무조건 1.4배 비싼 것으로 산정하는데, 사실 그 근거는 불분명하다. 이러한 TBM 공사비 거품을 빼는 것이 우선적인 중요한 일이며, 중국 등과 같이 장비 사양결정, 적정 장비 구매에 있어서, TBM 엔지니어를 활용한 견적과 TBM Procurement Service를 이용해야 경제적이고, 성공적인 공사의 수행이 가능해 질 것이다. TBM공사는 표준 품셈과 표준 내역이 존재하지 않으므로 기술력을 바탕으로 만든 견적서에 근거해 공사비가 산출되므로, 기술력에 따라 상대적으로 공사비 차가 많이 발생한다. 기술력이 공사비 산정에 핵심인 셈이다.

공사비 비교를 떠나서, 터널공사의 안전성, 터널공사 현장 주변의 소음저하, 지하수위 저하방지 등 환경친화적인 공법선택, 기존 NATM공법의 열악한 작업현장에 대한 자국 기술인력 기피현상 등을 고려한다면, 도심지 등에서의 TBM 굴착공법 적용은 세계적인 추세라 하겠다.

장차 건설부본도 한·미 FTA를 시작으로 여러 나라와 협정이 추진된다면, 중국을 비롯한 외국사들이 차지하게 될 국내 장대 TBM 터널 시장을 이대로 방관할 것인가? 장기적인 관점에서 TBM 기계화 시공에 대한 정책적 지원이 절실한 시점이다.

6. 국내의 기계화 시공 적용 현황과 전망

오른쪽의 그림 25는 2004년부터 2014년까지 예측되는 전 세계 교통터널의 수를 보여주고 있다. 장대 산악터널,

도심지 터널, 장대 해저터널의 건설이 활발히 이루어질 예정으로, 더욱이 지속가능한 발전(Sustain Development)과 녹색성장(Green Growth)의 대안으로 도심지 지하 공간을 활용하는 도심지 지하터널들이 활발히 계획 또는 건설되고 있다. 이로인한 TBM 시장규모의 급증이 예상된다.(TUNCONSTRUCT, 2008)⁴⁾ 가까운 중국의 경우 향후 20,000개의 터널계획으로 세계최대의 TBM 터널시장으로 급부상 할 것이다.

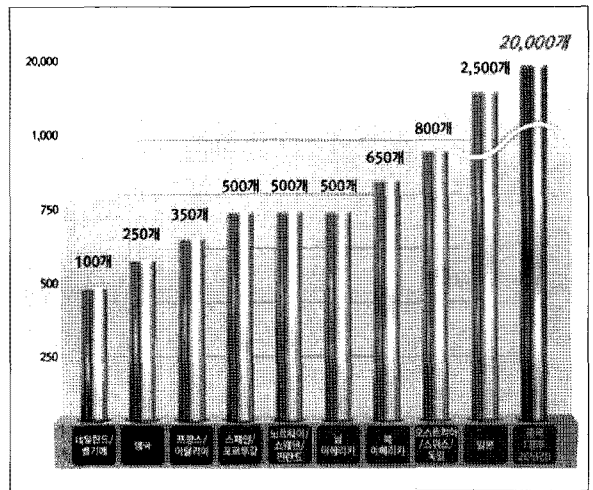


그림 25. 전세계 교통터널의 예상 수요(2004~2014)

이러한 상황에서 국내의 터널시공 기계화 적용률은 2% 미만으로 OECD 회원국 중 최저 비율을 차지하고 있으며, 지난 20년간 직경 Ø7m 이상의 대구경 교통터널에서의 적용율은 0.7%뿐이다. (표 4 참조)

이는 TBM 터널에 대한 전문 설계, 시공, 조사, 장비운용에 대한 전문가가 부족하고, 발주기관이나, 터널 엔지니어

표 4. 전 세계 도심지 교통터널에서의 TBM 적용비율^{3),5)}

국 가	유럽	일본	미국	중국	대만	한국
도심지 교통터널에서 TBM 적용 비율 (건설경제신문, 2009.10.13)	80%	60%	50%	40%	30%	< 1%

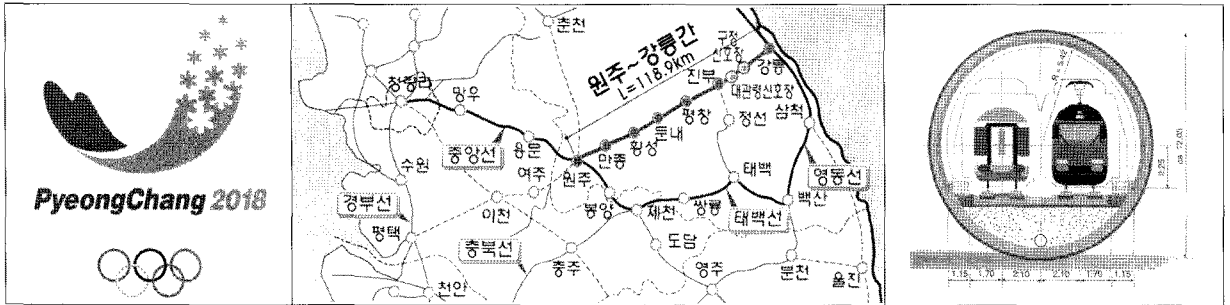


그림 26. 2018년 동계올림픽 개최지 확정으로 급진전되고 있는 원주~강릉간 복선철도

어가 기존 NATM공법 즉, 발파공법에 대해 너무도 익숙해져 있기 때문이다. 1985년부터 남침용 땅굴 발견용 및 수자원공사의 장대 수로터널공사를 목적으로 도입된 초창기 국내 TBM장비는 적절한 Engineering 설계 없이 저가의 장비가 30여대 들어와서 굴착을 시도했으나, 중생대 Crystal Rock인 국내 지반 조건에 맞지 않는 장비의 선정으로, 현장 적응에 실패하여 건설업체에 좋지 않은 선례를 남겼다. TBM 장비를 과다하게 12대를 들여온 유원 건설은 향후 TBM 터널의 건설물량 감소로 부도사태를 맞기도 하였다.

과거에는 터널의 공법 선정, 커터 선정, 커터헤드의 면판설계, 굴진율 예측 모델을 통한 적정 공기예측에 의한 공사비 산정 등 합리적인 터널기계화 설계에 대한 검토 및 분석 없이 저가 입찰에 의한 시공자와, 장비만 매도하려는 상술적 성향이 큰 에이전트 활동 외에는 TBM 설계 기술자의 엔지니어링 적용이 전혀 안된 상태였다. 그러한 결과로 제대로 설계가 안된 TBM 장비의 오작동에 의한 터널현장의 잦은 Down time등으로 TBM 공법은 국내에 적용이 어려운 것으로 인식되어 졌다. 단지 소규경 Micro TBM장비가 전력구 터널 등지에서 적용이 되어 명맥을 이어 왔으며, 국내의 TBM 전문시공업체는 Ultra 건설(전 유원건설), 대우조선해양(전 진로건설), 특수건설, 동아지질, 강릉건설, 아세아 등이 현재 국내 TBM 터널 건설 전문시공자로

알려져 있다.

앞으로, 우리나라는 평창 동계올림픽 유치로 인한 원주~강릉간 철도건설을 비롯해 도로, 해·하저 터널 등에서 20km가 넘는 초장대 터널들이 계획되고 있어, 아름다운 산악지대의 환경보호(지하수위 저하방지, 난개발 및 불필요한 작업용 터널굴착방지)를 위해 본격적인 전단면 대구경 경암 TBM 장비의 도입이 현실화 되어 가고 있다.

중국과 같이 굴진율을 높이고, 터널의 품질을 향상시키는 High-Power TBM의 도입은 앞으로 더욱 절실했다. 일단 이러한 국가과업을 통해서 새로운 암반 TBM의 성능과 터널의 경제적 시공능력이 입증된다면, 1인당 GDP 20,000\$ 시대에 걸맞는 TBM을 이용한 터널 기계화 시공이 국내 터널시공의 주력 공법이 될 것이다.

참고문헌

1. Maurice Jones—"Choices for excavation", Tunnel & Tunnelling, pp. 51. (2011년. 5월)
2. Maurice Jones—"Changing envelopes", Tunnel & Tunnelling, pp. 46. (2011년. 6월)
3. 건설기술인—"TBM 활용과 핵심기술확보" pp. 52-53. (2011년 7/8, 통권/05호)

4. Herrenknecht-High Performance TBM Solutions. (2011년)
5. 한국건설기술연구원-TBM 핵심 설계·부품기술 및 TBM터널의 최적건설기술. (2010년)
6. 포스코건설-세계의 TBM 터널. (2010년)
7. 박진수, 지왕률-“동북아에서 대구경 Shield TBM의 설계 및 시공사례”, 제11차 터널기계화시공기술 심포지엄 논문집 pp. 119~212. (2010년)
8. 한국터널공학회 터널공학 시리즈 3-터널기계화 시공설계편, 도서출판 씨아이알. (2008년)
9. 지왕률, 김도영-“차세대 고속굴착 HP TBM의 설계 및 시공적용”, 제 7차 터널기계화시공기술 심포지엄 논문집, pp. 61~71. (2006년)
10. Tunnel & Tunnelling - “World new” pp. 5(2011년. 8월)