한국 철도터널 기계화시공 활성화를 위한 고찰

The challenging resolution of the Mechanized Tunnelling in Korea Railway projects

| 박 진 수 |
(주)태조엔지니어링
이사

| 지 왕 률 |
(주)태조엔지니어링
사장

1. 서론

세계에서 가장 길다는 Gotthard Base Tunnel을 비롯해 시공 중이거나 운영 중인 전 세계 10대 초장대 터널 중에서 9건의 터널이 철도터널일 정도로 철도터널의 초장대화는 더욱 증가하는 추세이다.[3)]

이는 도시화에 따른 지역간의 이동수단으로 친환경적이고, 안전하며, 빠르고, 한번에 많은 수송능력을 갖춘 교통시스템으로는 철도가 최적인 까닭 일 것이다.

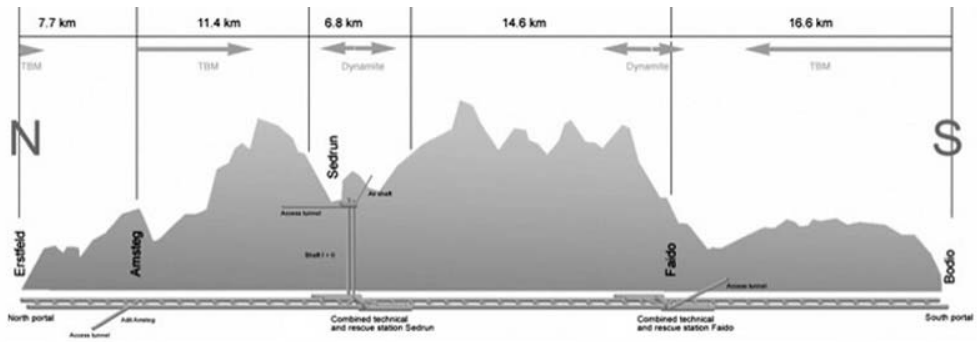
철도터널은 초장대화 뿐만 아니라, 철도단면의 대형화 및 다양화로 현재는 복층 철도터널 및 3선 운행 등 여러가지 단면형태가 나타나고 있다.(그림 1 참조)[8)]

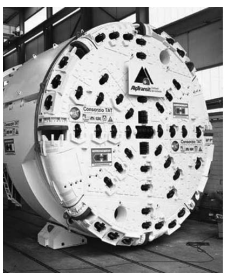
표1에서 보여주듯이 유럽을 바탕으로 세계적으로, 철도터널의 굴착공법은 기존의 재래식 굴착공법 (Conventional Method)인 발파공법(Drill & Blasting)에서 현재는 기계화 시공법(TBM:Tunnel Boring Machine)으로 일반화 되어졌다. 이는 삶의 질 향상에 따른 친환경적인 공법추구로 소음 · 진동 · 분진 저감 등으로 민원발생 우려가 적고, 지하수위 저하를 최소화시켜 주변 환경보호에 유리하고, 터널연장이 긴 경우 최소한의 작업구로 상부 지상구조물과 교통흐름 피해를 최소화 할 수 있고, TBM

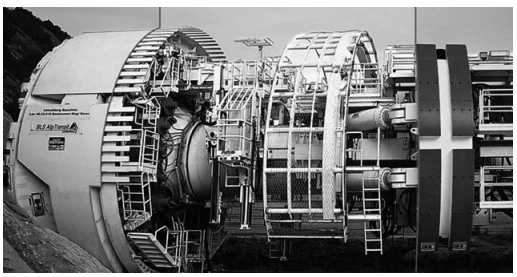
그림 1. 복층 및 3선으로 운행되는 Spain Barcelona L9[8)]

표 1. 세계10대 초장대 터널중 TBM으로 건설된 터널[3)]

Tunnel	Length(km)	Country	Use	Tunnelling method
Gotthard Base Tunnel	57.09	Switzerland	Railway	4 hard rock TBMs
Channel Tunnel	50.45	Great Britain- France	Railway	11 Shield TBMs
Lötschberg Base Tunnel	34.58	Switzerland	Railway	Hard rock TBM
Guadarrama Tunnel	28.38	Spain	Railway	4 high power shield TBMs
Pajares Base Tunnel	24.67	Spain	Railway	Double shield TBM + Single shield TBM







- 총공사비 : 약10조원
- 지질조건 : 편마암,화강암,점판암
- 터널연장 : 56.978km(Western tunnel) / 57.091km(Eastern tunnel)
- TBM 총길이 : 440m(부대장비 포함)
- TBM 총무게 : 3,000톤
- 최대 1일 굴진율 : 25~30m/day

그림 2. 세계최장의 철도터널인 Gotthard Base Tunnel에 적용된 Hard Rock TBM(스위스)

장비의 기술적인 발달로 일일 굴진율 증가에 따른 공사기간 축소가 가능해 장대터널 일수록 기존공법보다 경제적이기 때문이다.

하지만 현재 우리나라의 TBM 공법기술은 세계적인 수준과는 적지 않은 격차를 보이고 있다.(그림3, 표2 참조) 일례로 TBM Main Drive의 Power 부족으로 작은 단면에 한

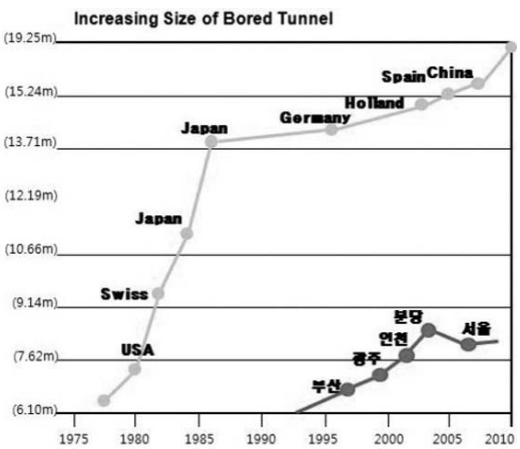


그림 3. 국내 · 외 TBM 장비 단면크기 비교[5)]

하던 TBM 단면 제작 기술은 현재 러시아 St. Petersburg Orlovski 터널에서 Ø19.25m 정도의 대구경 TBM 장비 투입이 가능할 정도까지 발전했음에도 불구하고,[2)] 우리나라에 적용된 대구경 쉴드 TBM의 사례는 분당선 3공구에 투입한 Ø8.1m로 세계적인 기록과는 상당한 차이를 보이고 있다. 또한, 공사기간과 공사비에 지대한 영향을 미치는 굴진율도 세계적인 평균 기록과는 2배에서 많게는 6배 이상의 많은 차이를 보이고 있는 안타까운 현실이다.[1)]

본 고에서는 한국 철도터널 기계화 시공기술의 문제점 및 개선방안을 고찰함으로써, 앞으로 다가올 기계화 시공시대에 적합한 방향 제시가 되었으면 하는 바램이다.

표 2. 국내 · 외 TBM 시공시 굴진속도 비교[1)]

과업명		장비형식	장비외경 (m)	평균굴진율 (m/day)
국내	죽령터널	Open TBM	4.5	16.6~17.2
	부산지하철	Slurry 쉴드TBM	7.3	1.4~5.2
	서울지하철	Slurry 쉴드TBM	7.8	5.6~6.7
해외	리버마운틴	Open TBM	4.3	68.0
	카디스급수로	Double 쉴드TBM	4.9	28.8
	도보해협터널	EPB 쉴드TBM	8.8	22.8

2. 본론

기계화 시공기술은 터널굴착기술의 주력기술로서, 적용 TBM 장비에 대한 기계, 유압, 전기적인 기술의 개발이 필요하고, 거대한 규모의 중장비의 사용을 전제로 하기 때문에 부품산업의 개발이 중요하다. 자동차 산업과 같이 주요 부품의 원활한 공급이 가능하지 않는다면, 여러 복합적인 측면에서 발전이 미미할 것이고, 그렇다고 수입 부품만으로 시공이 계속 되어 진다면, 공사비 측면에서도 기존의 발파공법(Drill & Blasting)에 비해서 경쟁력을 갖추기가 쉽지 않을 것이다.

또한 대구경 TBM의 경우 Plant적인 성격이 강하므로, 제대로 된 장비의 구입 · 조달에 있어서 TBM전문가의 Procurement Service를 통해서 이루어져야 과거 30년간의 반복적인 실패에 대한 근본적인 문제(부적합한 장비사양, 비전문적인 장비구매, 장비운전 미숙, 과다한 공사비 지출 등) 해결이 가능할 것이다. 다음은 한국 터널기계화 시공 기술의 발전을 위해 필요한 사항들을 구분하여 정리하였다.

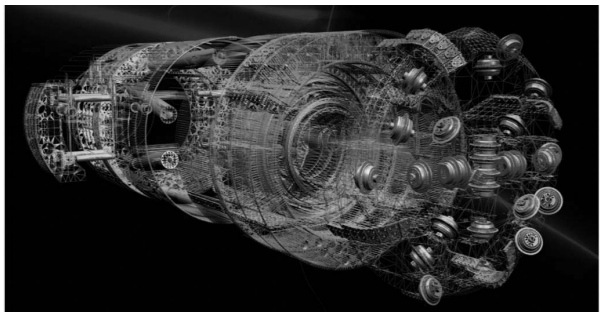


그림 4. TBM의 퓨전융합기술

2.1 디스크커터의 국산화

TBM 부품 중에서 터널 공사비의 10~15% 정도를 차지하고 있는 것이 소모성 커터에 대한 비용이다((사) 일본터널기술협회(2000))[7]. 국내의 작은 중소기업들이 생산하는 연약지반용 커터는 모방 수준에서 제작을 시작하여 현재는 국내 · 외 저가 커터시장에 진출해 있다. 하지만 경암반 이상에서 사용되는 커터는 외국제품에 비해서 마모도, 결손, 박리, 탈락 등에 있어서 큰 차이가 있는 상태로, 초경합금의 제조기술개발과 열처리기술개발 등에서 재료 분야 기술자와 연계, 국산 커터의 재질개선에 대한 연구 투자가 필요하다. 국내 지반조건에 적합한 경암용 커터의 개발이 이루어진다면, 최소한 커터 비용에 있어서 많은 절감이 가능하여,TBM공사비의 10%정도는 공사비를 낮출 수 있을 것으로 예측된다.

2.2 TBM 후방장비의 국산화

TBM 장비를 국산화 하는 것은 국내 중공업의 세계적인 위상을 살펴 볼 때, 기술적으로 큰 문제는 아닐 것으로 판단된다. 하지만 현재와 같이 국내 TBM 시장의 수요가 열리지 않은 상황에서는 국산화는 큰 의미가 없다.

가능한 빠른 기간 안에 우리의 기술수준이 TBM장비를 제작, 조립, 해체, 수리하면서, 장비 제작 도면을 만들어 부

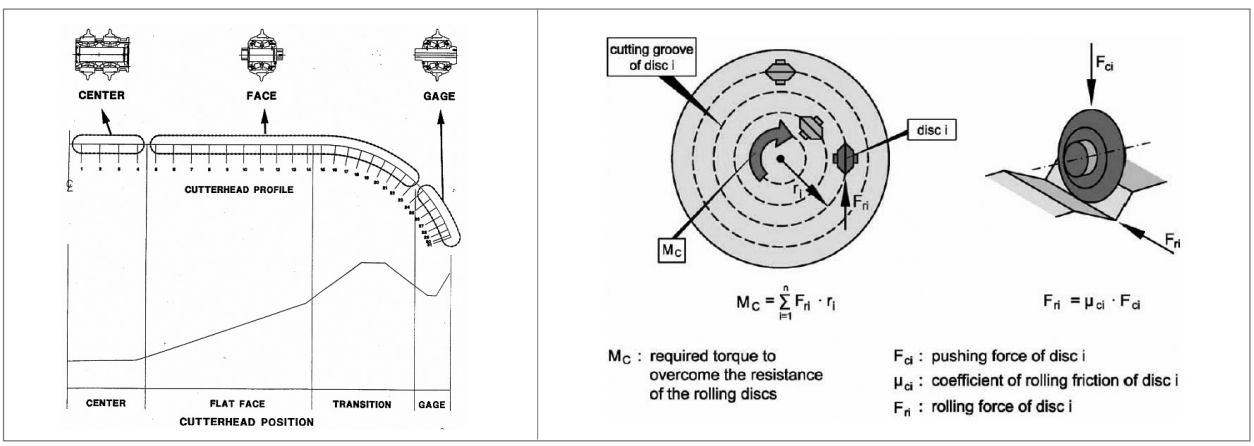


그림 5. 디스크커터의 배치와 절삭이론[1]

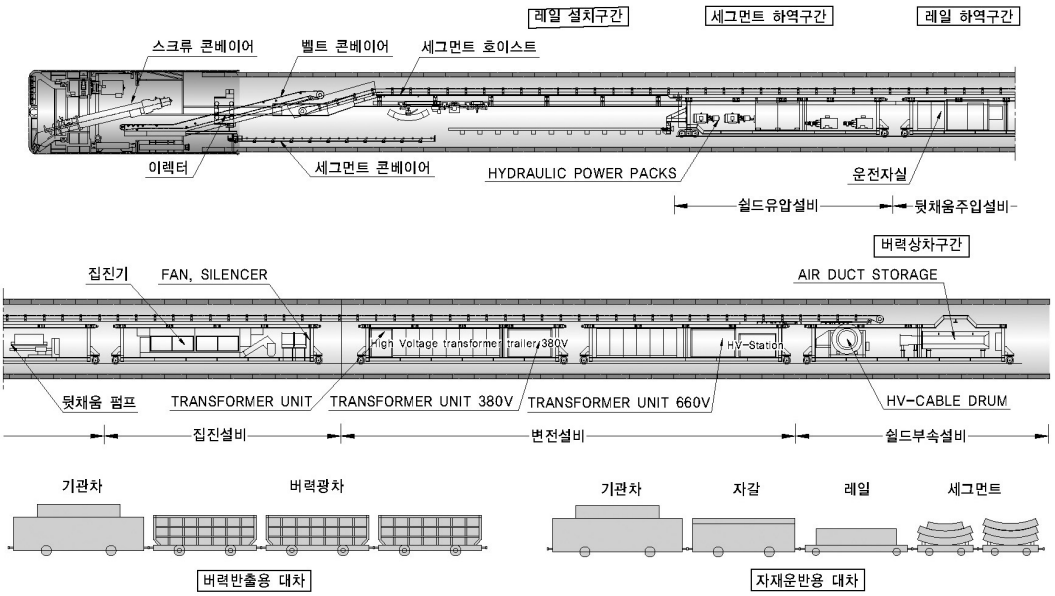


그림 6. 후방장비에 대한 개념도 및 대차[1)]

분적인 제작이 가능한 단계로 접근해야 하며, 우선적으로 커터헤드 운용을 지원하면서, 투입자재의 운반 및 버력반출의 역할을 하는 TBM 후방대차만이라도 국내 제작을 시도하는 것이 바람직할 것이다. TBM 적용국가의 경향을 분석해보니 국산화를 시작하는 순간부터, TBM장비의 수입가격은 하락 하는 것으로 예측 · 분석되었다.

2.3 TBM 커터헤드의 국산화

우리나라의 기반암은 중생대(Mesozoic Era) 수정질 암반으로 그 강도와 경도가 높은 수준이다. 이러한 우리나라의 지반 조건에 적합한 TBM장비 사양을 선정하고, 이를 특화시켜 제작에 접목시키면 국내 TBM공사비 단가가 내려갈 것이다.

통상적으로 국내교통터널(Trafiic Tunnel) 프로젝트 설계 시 TBM공법의 공사비를 NATM공법 공사비의 1.4배로 산정하고 있으나, 연장이 2km가 넘고, 지반 조건에 적합한 장비를 투입할 수 있다면, NATM공법보다 더 싼 가격 경쟁도 가능 하다는 분석이 많이 나오고 있다.[4)]

문제는 굴진율과 장비 가동율에 대한 부분인데, 가까운 중국의 경우를 살펴보면 경암의 지반조건에서 직경이 10m인 터널에서 일일 굴진율은 평균 20m/day 보이고 있고, 장

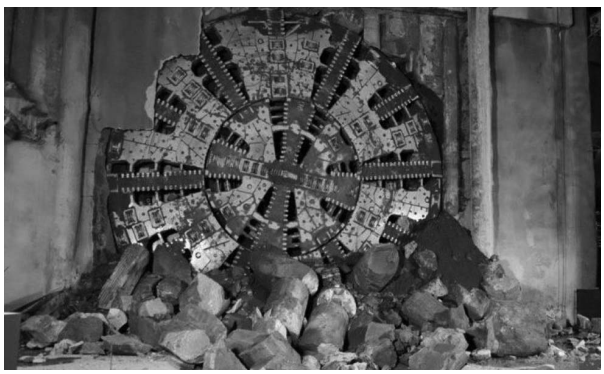


그림 7. 스페인M30 관통직후 커터헤드

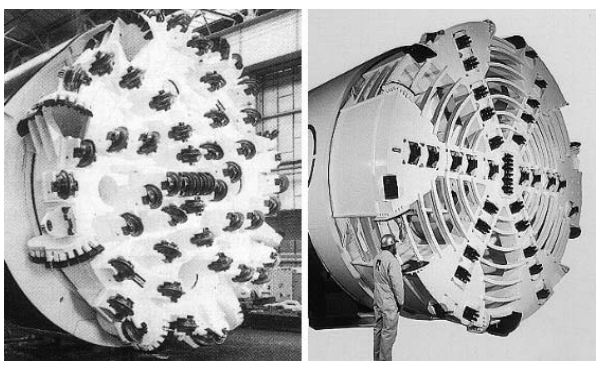


그림 8. 돔형커터헤드(좌측), 평판형커터헤드(우측)[1)]

비 가동율은 48~50%를 보이고 있다. 우리나라의 일일 굴진율 5~8m/day, 평균 가동율 30%이하로 많은 차이가 나며 현실적으로 너무도 낮은 수치이다. 그러나 향후 좋은 장비로 많은 프로젝트를 수행하면 터널의 단순반복적인 작업 사이클의 특성상, 세월이 흘러 기술력이 향상 되면 굴진율과 가동율은 중국에 못지 않게 향상 될 것이다. 또한 이를 통해 공사기간을 줄일 수 있어, 공사비 절감 효과와 더불어 시공사의 공사 실행율이 향상되어 시공성, 안전성, 경제성 등에서 아주 유리한 공법이 될 것이다.

차후, TBM공법이 일반화되면, 중국과 같이 전문성을 갖춘 TBM 전문 시공사가 많이 생길 것이고, 경쟁을 통해 공사비는 더욱 절감될 것으로 예측되며, TBM장비의 재사용율이 늘어나기 때문에 외국과 같이 Major Contractor에서 TBM 사업부를 만들어 직영하는 것도 가능 할 것이다.

2.4 중고장비의 정비 및 수리 전문화

TBM 장비를 국산화하는 것도 국내 시장 규모에 따라 영향을 받는 요인이지만, 새로 국내에 유입되는 장비의 보수정비 정도는 국내에서 수행 할 수 있는 방안을 찾아야 한다. 그것이 기술적으로 불가능하다면, 초기에는 장비를 원 제작사에 보내서, 보수 Manual에 맞춰서 제대로 보수를 해야 한다. 보수중 TBM 전문기술자의 Inspection 검증이 필요하고, Commissioning을 거쳐서 보수를 완료하고, 수리한 원 제작사의 품질 보증(Guarantee)을 받아야 한다. 단순하게 파이프정도 교체하고, 페인트를 칠하는 것이 아니라 TBM의 원래의 굴착기능을 100% 복원해야 한다. 첫번째 재활용된 장비가 원 제작사의 Guarantee를 받으면, 새장비가의 75%를 호가 할 수 있다. 이러한 다양한 방법의 보수작업을 통해 소구경 TBM 제작 등이 가능해 진다. 이때, 중고장비의 재활용시 주의 할 것은 새로 시공될 터널의 크기, 연장, 깊이에 따른 토압의 분포상태, 지반의 종류 등을 당연히 고려하여야 한다.

2.5 TBM 장비 Procurement의 개선

2.5.1 향후 TBM공사 활성화를 위한 TBM장비 조달 방안

과거에 비해 대형화 된 교통터널(Traffic Tunnel) TBM 공사에 적용되는 장비 규모는 현재 세계적으로 최대장비 직경이 Ø19m 까지 이르고 있다. TBM장비의 직경이 Ø7m가 넘는 대구경 Traffic TBM은 단순 굴착장비라기 보다는 Plant에 가까운 실정이다. 일반적으로 TBM의 구매는 단순한 건설장비를 넘어서 TBM 전문가의 Procurement Service를 통해 이뤄진다. 중국 등 외국의 경우도 발주처는 장비구매를 Procurement Consultant에게 Service를 의뢰하여, 이 복잡한 Plant를 설계목적에 맞는 사양으로 경제적인 구매가 이뤄지도록 하고 있다. 국내의 일반 건설기술자들은 대구경 TBM을 도져나 백호우 같은 일반 건설장비로 간주하는 우를 범하는데, TBM은 엔지니어링이 필요한 설계를 통해 주문 제작되고, 장비의 제작, 검수, 시운전, 인수

그림 9. 중고장비 정비 및 조립 전문 공장

등 복잡한 과정이 전문가의 Procurement Service를 통해 이뤄진다. 터널공사가 TBM공법을 채택할 경우, TBM 장비에 대한 소규모의 EPC System이 적용되어야 하고, 이러한 중요한 문제들이 국내에서는 일반건설 장비를 구매하듯이 생각되있어, 현장 지반조건에 적합한 제대로 된 사양의 TBM장비 구입을 하지 못하여, 국내 TBM 터널공사의 주된 실패요인이 되어 왔다. 즉, TBM장비는 Plant적 요소를 포함하고 있는 반면에, 터널 구조물이나, 시공은 일반 토목적 요소를 갖고 있는데, 앞으로 TBM장비 구매는 일반 Plant 공사와 같이 Procurement Service를 통해서 이뤄져야 한다.

2.5.2 TBM의 예비설계(Preliminary Design) 단계에서의 구매 행위

일반적으로 건설 장비의 구매에서 장비의 설계제작은 구매 행위에 포함되지 않고 제작사의 자체 모델의 사양에 의하여 구매의사가 결정된다. 그러나 TBM 장비는 Plant나 조선의 경우와 마찬가지로 Procurement 과정이 설계제작에 당연히 포함된다. 따라서 구매자는 이 과정의 관리에 참여 하여야 한다. 특히 대구경 터널의 경우 장비의 규모가 직경이 Ø7~19m, 대당 하중이 3,000~6,000ton에 이르며, 길이 또한 150m~250m가 되므로 터널의 설계 시에 장비의 조립운전에 대한 여건이 반영되어야 하며 장비설계 또한 터널의 제반 환경에 맞게 설계되어야 하므로 TBM제작사와 터널관련 TBM Procurement Engineer와의 기술정보 교환 및 합의는 매우 중요하다. TBM의 Preliminary Design이 입찰과정의 심의를 거쳤음에도 다시 진행되는 것은 터널의 모든 설계분야와의 기술합의와 Risk Management의 과정에서 나타난 문제를 반영해야 하기 때문이다. 이때 반영해야 할 사항 중에는 TBM 구매계약의 범위를 넘어선 경우도 있다. 이때 해외의 경우에는 계약 당사자들의 계약에 입각한 합의에 의해서 변경을 한다. 구매 중 이런 과정은 지반환경의 불확실한 상황에 대해 설계 진척도에 따라 보다 적절한 대응방안을 마련하는 것이고, 나아가 TBM 장비가 현장에 투입하기 이전에 대부분의 Risk 사항을 제거하거나 축소시키는 결과를 가져오므로 TBM 장비의 굴진율이 개선되어 공사비 절감이 가능해 진다.

장비 제작 시 구매 행위는 아래와 같이 제작감독, 공정관리, 품질관리로 이루어진다.[6)]

- 제작감독(Manufacturing Supervision)
- 공정관리(Management & Controlling of The Progress)
- 품질관리(The Quality Controlling of The Equipment Manufacturing)

감리(Supervision)업무의 기준(Principle & Rule)은 구매계약서에 명시된 제작감독의 경로와 상세규칙에 따른다. 제조공정의 기술적 분류는 기계 · 전기 · 계장 · 배관 · 구조 · 자재로서 각 분야의 품질관리 기준을 수행할 Engineer의 감독활동을 필요로 한다. 품질관리란 TBM에 포함된 많은 System, Equipment, Structure 등이 설계도서에 맞게 자재가 투입되고 제작되는가를 Client를 대신해서 감독하는 것을 말한다. 그리고 제작의 마지막 시험단계인 시험

그림 10. TBM Procurement중의 일부인 이동과 조립

운전을 거치게 된다. 아래는 TBM Procurement에 따른 업무 영역을 나타낸 것이다.

TBM Procurement Workscope.

1. Machine Purchase
2. Spare Parts Supply Agreement
3. Machine Assembly and Commissioning on Site
4. Cutter Supply agreement
5. Machine Disassembly
6. Operational Personnel Supply
7. Machine Operation
8. Buyback of Equipment
9. Delivery of Equipment to the Site
10. Return Shipment of the Equipment from the Site after the job is completed
11. Maintenance
12. Technical Consulting during the Machine Operation

2.6 TBM 터널 Project의 연속성 및 전담 기술진의 육성

TBM 공사가 우리에게 아직도 익숙치 않은 것은 단순한 토목공사인 일반토목의 시각으로 접근하기 때문이다. TBM은 공사관리, 터널공학, 기계공학, 재료공학, 전기공학, 시스템, 물류시스템 등 Plant적 성격이 큰 융합기술(Fusion Technology)로서 종합적인 관점으로 각 분야가 오픈 마인드의 자세로 협력해야만 원활한 설계 및 시공이 가능하다.

미래에는 대학에서 기계공학이 중심에 서거나 토목공학, 터널공학이 중심에 서거나 상관없이 우선적으로 TBM 기술자를 배출하는 대학이 신설되었으면 한다. 각 분야를 터널의 기계화 시공, 융합 기술로 하나하나 풀어가는 협력 방안이 절실하기 때문이다. 터널공법이 발파에서 기계화 시공으로 변하는 것은 세계적인 흐름이다. 이러한 터널산업의 Trend변화에 대해서 우리도 투자하고, 준비해서, 세계적인 흐름에서 뒤쳐져서는 안 될 것이다.

차후 터널기계화 시공이 우리나라에서 발전하는데 큰 무리가 없다고 믿는 이유는 터널공학과 기계공학 등의 Basic Infra에서 큰 장점을 지니고 있기 때문이다. 그리고 이를 잘 융합하여 끌고 가서 차세대 엔지니어를 육성 한다면 더 큰 발전을 가져올 것이라 믿어 의심치 않는다.

3. 결론

세계적으로 널리 쓰이는 대구경 TBM의 국내 활성화를 위해 필요한 것은 무엇인가?를 여러 요인들을 모아서 검토 · 분석해보니 보다 빠르고, 싸고, 환경 친화적인 대구경 TBM의 국내 적용이 멀지 않은 현실로 다가옴을 알 수 있었다. 물론, TBM 공법에 대한 공사비 문제는 단순하게 접

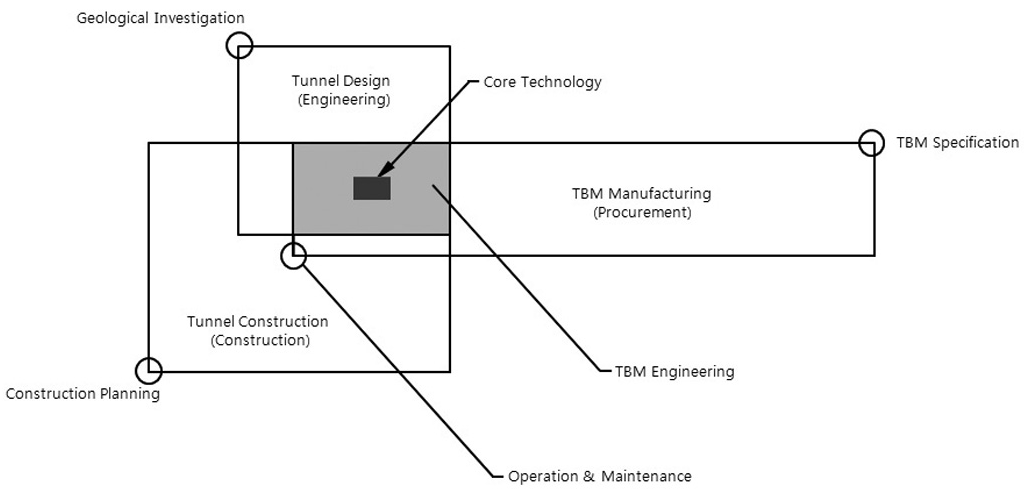


그림 11. TBM Engineering의 전반적인 Workscope[5)]

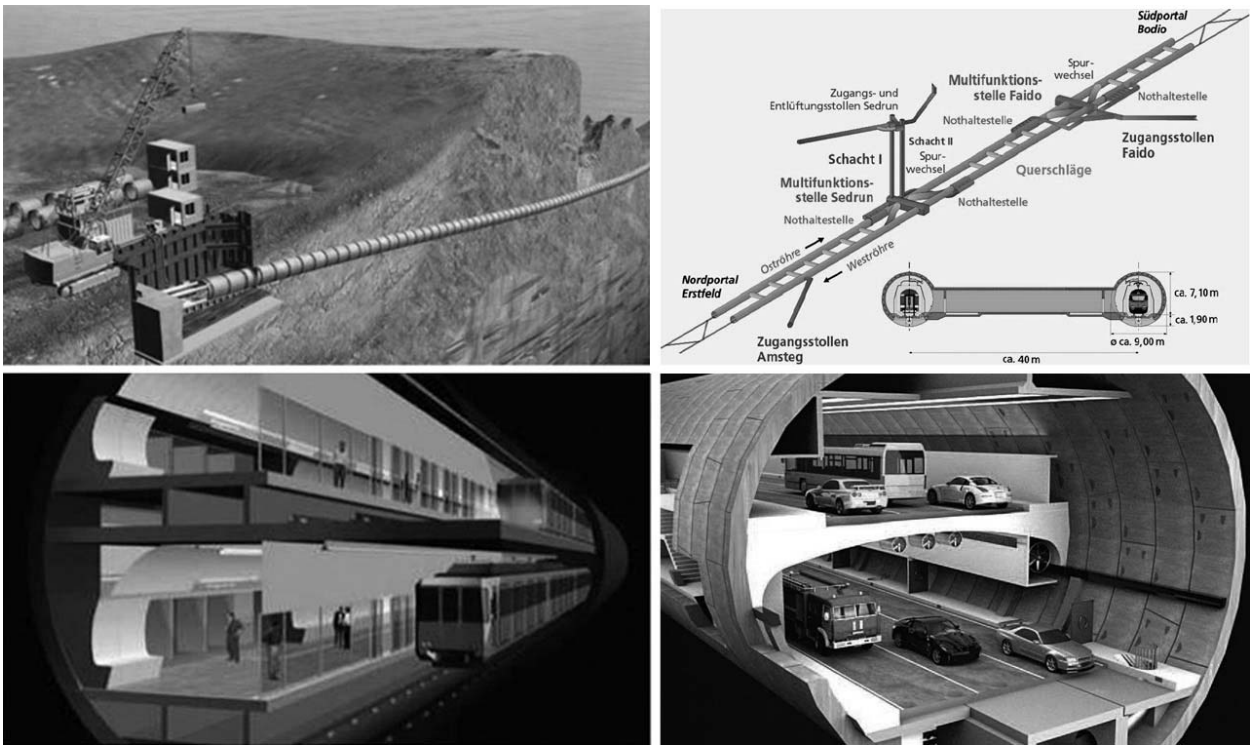


그림 12. TBM 발주로 유리한 사업들(좌측상단으로부터 시계방향-해저터널, 초장대터널, 도심지터널, 복층터널)

근할 수 없는 문제이나, TBM 공사비 견적 전문가들이 부족하다 보니, 국내 전문회사에서 시공 경험 부재로 인한 과다한 시공 Risk등을 고려한 거품 공사비가 많았다. 동일한 터널공사에 대한 TBM공사비 견적이 설계기술자에 따라서 많은 차이를 보이는 것은 기술력에서 비롯되는 것이고, 과거의 국내 TBM전문 시공업체의 원 견적을 기술적 평가 없이 받아 들였기 때문이다. 이러한 문제는 TBM공법을 적용해야만 하는 프로젝트 등을 통해서 하나 하나 개선될 것이다.

현재 Modern High-Power TBM의 등장은 과거의 TBM장비의 문제점을 개선한 것으로 공기단축, 공사비 절감 등으로 중국만 해도 대구경 TBM 보유댓수가 1,000대에 이르며, 연장이 2km가 넘으면 TBM 공법 적용이 일반화 되었고, 도심지 지하철의 경우도 민원발생 최소화할 수 있고, 환경친화적인 TBM공사가 일반화 되어 있다. 또한, 중국은 2012년 28개 도시에서 TBM 공법으로 발주되는 지하철 공사비만 해도 161조원에 달하고 있다.

TBM공법 적용이 보편화 되면, 공사에 필요한 부품의 국내 생산이 활성화 될 것이고, 공사비 절감에 큰 효과가 있을 것이고, 해외에 비해 비싼 PC Segment 가격도 공급 물량 증가에 따라 많은 부분의 가격 절감이 예측 된다. 현지 지반 조건에 적합한 장비의 구매도 중국과 같이 전문 TBM 엔지니어의 Procurement Service를 통해 잘 구매 조달하면, 굴진율이 개선되어 공기 절감 및 공사비 절감에 큰 효과가 있을 것이다. 현장 지반 조건에 맞춰 설계된 High-Power TBM은 수리 보수를 통해 재활용이 가능하므로 이 또한 공사비 절감의 중요한 사례가 될 것이다.

앞으로 기계화 시공이 일반화 되면 중국과 같이 대구경 TBM 전문운영회사(Operation)가 많이 시장에 형성 될 것이고, 곧 국제화가 가능 할 것이다. TBM 장비가 발달함에 따라 TBM Operation도 개선되며, 장비 재활용이 가능해 지기 때문에 발주자나 주요 시공사가 장비를 소유하는 OPP(Owner Procure Process)방식도 일반화 될 수 있다. 또한, TBM Procurement Engineer를 통하여 장비 도입, 검수, 시운전, 초기굴착 등에 대해 전문적 Consulting이 가능할 것이고, 비전문가를 통해 잘못된 TBM을 고가에 구입하

는 실수도 사라 질 것이다. 외국의 경우는 주시공사가 Procurement Consulting을 통해 TBM 공사를 TBM 장비 + 시공 + 부품공급까지 일괄 외주 관리하기도 한다. 중국의 경우만 보아도, TBM Procurement Consultant, TBM Operator 회사가 많이 있으며, 이 시스템을 통해 공사비 절감 효과를 크게 보고 있다.

최근의 기술 동향을 보면, 연장이 3km 넘는 다양한 터널도 TBM으로 시공하는 것이 경제적이라는 것이 연구 · 보고 되 는 (Tunnel &Tunnelling, 2011, May : Choice of Excavation)[9] 현실에 지하 발파 터널현장을 기피하는 전국의 노동시장 실정을 감안하면 기계화 시공은 필연적으로 가야 할 길이며, 우리나라도 이에 따른 TBM공법으로의 발주 및 시공하는 것이 타당할 것이다.

TBM공법과 NATM공법의 공법 비교는 현황, 연장, 터널 단면, 공기, 공사비 등에 따라서 기본계획 때부터 면밀하게 분석하여, 단순한 저가 입찰 방법보다는 해저, 하저, 장대 산악 터널, 도심지 복잡구간 등 TBM이 적합한 프로젝트는 TBM으로 발주를 하는 것이 안전하고 원활한 터널건설에 필요할 것이다.

석기시대가 역사속으로 사라진 것은 사방에 깔려 있는 돌이 부족해서가 아니라, 청동기라는 신문물의 등장에 따른 것이다. 또한 Digital Camera를 발명해 놓고도, 기술의 중요성을 인지 못해 파산한 Kodak Film등은 우리가 반면교사로 삼아야 할 것이다.

TBM Engineer 뿐만 아니라 우리나라의 건설인들은 보다 창조적이고, 도전적이며, 여러 분야에 대한 Open Mind를 가지고, 새로운 것에 대한 호기심이 충만한 진취적인 사고가 필요 할 것이다.

♣ 참고 문헌

1. 한국터널공학회 터널공학시리즈 3(2008), 터널기계화시공 설계편, 도서출판 씨아이알
2. 박진수, 지왕률(2011), "한강하저터널의 대구경 쉴드TBM 설계", 제12차 터널기계화 시공기술 국제심포지엄 논문집, pp 131~146
3. 장수호, 지왕률, 배규진(2008), "국내외 주요 TBM 터널의 현황과 전망", 제9차 터널 기계화 시공기술 국제심포지엄 논문집, pp 129~152
4. 지왕률, 박진수(2011), "한국 터널기계화 시공기술의 현황 및 전망" , 자연,터널 그리고 지하공간 한국터널지하공간학회 학회지 Vol13. No4, pp 64~76
5. 지왕률, 윤희로, 최재화(2010), "TBM Engineering의 이해와 고찰", 제11차 터널 기계화 시공기술 국제심포지엄 논문집, pp 109~122
6. 지왕률, 한명식, 최재화(2011), "선진화된 TBM 조달시스템", 자연,터널 그리고 지하공간 한국터널지하공간학회 학회지 Vol13. No3, pp 39~46
7. 한국건설기술연구원(2010), "TBM 핵심설계·부품기술 및 TBM 터널의 최적 건설기술"
8. Mark Merrie(2010), "Hard Rock tunnel boring meachines Case studies of three tunnels in spain", 제11차 터널기계화 시공기술 국제심포지엄 논문집, pp 35~41
9. Maurice Jones(2011), Choices for excavation, Tunnel & Tunnelling Journal, pp 5