

부산시 수정산배수지터널 TBM 굴진시 공법적합성을 평가하기 위한 암반의 지질공학적 평가

Engineering geologic evaluation of TBM tunneling compatibility on Sujongsan drainage tunnel project

양 인 재(Yang In Jae)	(주) 유니백
은 성 민(Eun Seong Min)	(주) 유니백
김 우 중(Kim U Jeong)	(주) 유니백
우 상 우(Woo Sang Woo)	울트라건설(주)

요약

TBM 터널굴진시 공법적합성을 평가하기 위한 현장조사 및 물리탐사와 세부지질조사를 수행하였다. 해당지역은 부산시 진구 가야동과 동구 수정동이며 인근 수원지인 덕정정수장에서 생산하는 수돗물을 수정산 배수지까지 확대 공급함으로써 송수공급 계통의 이원화로 안정적인 수돗물공급을 수행하기 위한 배수지터널이다. 이론적으로 굴착속도는 암반의 반발경도, 일축압축강도, 석영함량 및 각종 지질특성에 의하여 좌우되는데, 실지 시공에 있어서는 현장여건상 지질조건이나 일축압축강도등 한정된 자료들을 토대로 시공에 임할 수 밖에 없다. 이러한 한계를 극복하기 위한 모형개발을 목표로 본 연구에서는 다양한 현장시험을 토대로 한 TBM 굴진 적합성을 검토하고자 하였다. 국내 시공경험상 및 지질특성만을 고려할 때 본 과업구간의 TBM 적용성은 양호할 것으로 판단하였으나, 뚜렷한 근거에 의거하지 않은 설계는 시공단계에서 엄청난 손실을 야기하게 되므로 보다 상세한 검토를 수행하게 되었다. 본연구에서는 TBM 공법선정의 적합성을 검토하기 각종 조사 자료들을 정리하였고, 국내시험의 한계점들을 극복하기 위한 적합한 모형개발의 필요성을 제시하고자 하였다.

서론

터널설계를 위한 기본철학은 터널계획 수립을 위한 각종 공학적인 판단의 근간은 미지의 터널구간에 대한 각종 시험, 물리탐사성과 및 경험적인 기술자의 견해를 토대로 이루어져야 한다는 것이다. 설계의 전 과정들은 국내 암반특성에 걸맞은 지반조사결과를 토대로 한 합리적인 설계기준들을 바탕으로 수립되어야 하며, 이로서 지역별 지질특성에 걸맞는 최적의 지하공간창출이 가능하다. 일부 설계에서 지반조건에 대한 충분한 정보를 분석하지 못하고 선부른 판단과 오해를 반복함으로써 시공 중에 막대한 지장을 초래하거나 전체 기술인들을 오도하는 결과를 낳는 사례가 있다. 또한, T/K나 대안입찰공사의 특성상 이러한 경우 업

청난 손해(Risk)를 감수하여야 하므로, 설계와 시공과정에서 사전에 이러한 문제점들을 최대한 포괄할 수 있는 조사계획 및 조사기법의 도입이 절실히 필요하다고 판단된다.

공사개요

해당지역은 '수정산 터널배수지 설치공사 TK-1 설계'와 관련한 부산지역에 인접한 배수지터널이다. 기존의 불합리한 급수체계를 개선하고 보다 양질의 물을 부산시민들에게 공급하기 위한 사업으로서, 본공사의 주안점은 ①안정적인 수리시스템을 위한 양수장설치, ②수급시설의 일원화를 위한 관로, ③원활한 급수구역설정을 위한 터널관통으로 이루어진다. 과업구간은 부산만에 인접하여 수계가 짧고 산악지형의 기복이 큰 특징을 보인다. 화강암지역은 다소 구릉성 지형을, 안산암지역은 산악지형을 이루었다.(그림 1) 터널은 부산 진구 가야동에서 부산 동구 수정동을 잇는 전체연장 1.835km의 급수용 배수지터널로서 종단선형이 GL기준 140.0m 이상의 고지대에 위치하며, 터널부 전체면적은 10,221㎡, 터널 폭 5.7m로서 순수 저유면적이 19,100㎡에 이른다. 본공사에 도입된 TBM은 재래식의 천공 및 발파를 반복하는 굴착공법과는 달리 무진동, 무발파에 의한 자동화된 터널굴착장비로, 터널 전단면을 동시에 굴착해 나가는 굴착기계이다.(그림 2)

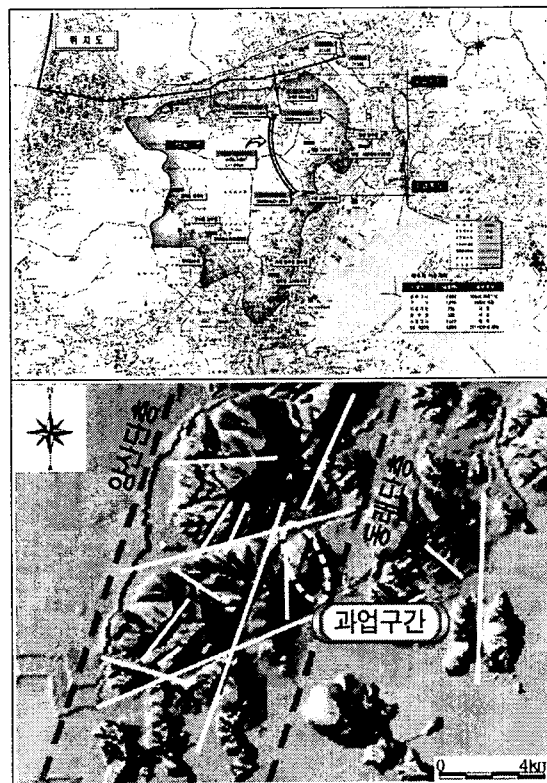


Fig 1. Location map and Remote sensing image analysis on the project area

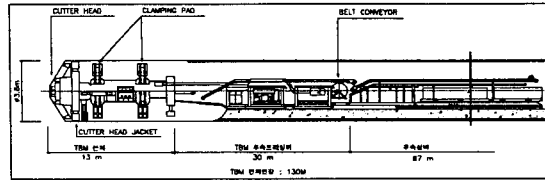


Fig 2. Sketch of Tunnel boring machine

설계개요

저수용량은 35,049m³로서 소요용량을 만족하기 위하여 확공이 필요하였고 TBM 굴진완료 후 하부정리를 위한 발파를 수행하도록 계획하였다. 터널입출구부에서 각각 민원과 지질불량이 예상되어 터널시점부는 GNR 공법에 의한 무진동파쇄를, 터널출구부는 기계굴착후 보조공법에 의한 갱구부 보강을 수행토록 계획하였으며 나머지구간을 TBM장비로서 굴진하도록 설계하였다. TBM 적용성을 위한 기본적인 지질특성은 Q_{TBM} 1.0이상인 보통~양호한 암반으로 일정 시간 무지보 유지가 가능할 것, 일축압축강도가 200MPa이하로서 절삭식이나 압쇄식에 의해 굴삭이 가능할 것, 순굴진속도(PR, m/hr)가 1.0m/hr를 상회하여 경제성을 만족할 것, 점하중강도가 50kgf/cm²이상으로 순가동을 20%이상을 만족할 것 등이다. 또한 터널 구간이 도심지이고 입출구부가 7부 이상의 능선을 이루고 있으며, 배수지특성상 일정설계기준이상 수밀성을 유지하여야 하며, 물리탐사결과 터널구간에 단층징후가 노출되지 않은 점 등이 과업구간의 터널 굴착공법을 TBM으로 선정하는데 기초설계자료가 되었다.

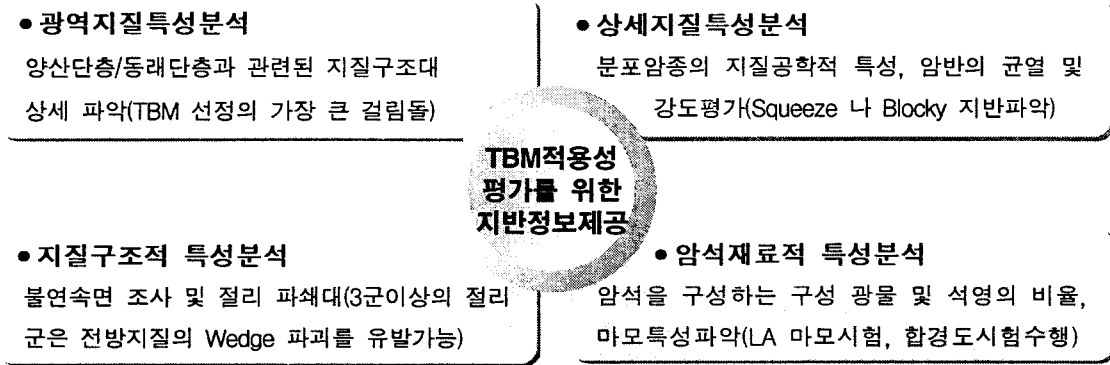
조사수행의 기법소개

실지로 TBM 터널굴착적합성을 검토하기 위한 보다 광범위한 조사기법은 아직 국내에서는 보편적이지 않거나 적용성이 낮은 것으로 확인되었다. 도심구간을 관통하는 수정산배수지터널의 현황조사의 일환으로서 본 연구에서는 표 1에서 보는 바와 같이 4가지의 상세조사 계획을 수립하여 각단계별 조사항목을 분석하고자 하였다. 각 단계별로 이루어진 조사성과 들은 다음단계의 조사를 수행하는데 기초자료가 된다.

광역 지질특성분석

TBM 공법선정시 가장 걸림돌이 되는 것은 단층파쇄대나 연약대의 존재여부이다. 실지로 올해 1월 20일 완공된 부산시 제3고속도로 수정산 도로터널은 공기절감을 위해 TBM구간(좌천동 상행선)과 NATM구간으로 나누어 동시연행 작업을 실시하였는데, TBM 터널 굴진 후 약 200m지점에 단층 파쇄대를 관통하여 더 이상 진행치 못하고 인력작업후 보강하는 등

Table 1. Index map of geotechnical investigation procedure for the application of TBM



시공상 어려움도 있었다고 한다. 다행히 현재에는 하루 3만여대가 지나다니며 교통분산의 제기능을 발휘하고 있다. 수정산배수지터널은 수정산도로터널 공사시 발파진동에 따른 민원을 벤치마킹하여, 지질조건 분석을 통한 기계굴착 적합성을 검토하여 시공성을 개선하고자 하였다. 인공위성사진과 음영기복도를 활용한 선구조분석 및 지표지질조사 결과 과업구간에는 뚜렷한 선구조는 인지되지 않으므로, 대규모단층대의 영향은 없는 것으로 판명되었다. 70년대와 90년대 국립지리원의 항공사진을 비교분석한 경우에도 암경계는 다소 구분이 용이하지만 (그림 3) 특별한 단층경계면은 노출되지 않는다.

상세 지질특성분석

지표지질조사시 터널시점측은 불국사 화강암이며 실내시험에 의한 일축압축강도는 1,190~2,010kgf/cm², 안산암의 경우 520~1,440kgf/cm²에 해당하여 기존 시공사례(표 2)와 일축압축강도특성에 의해서는 TBM 굴진이 유리한 것으로 판단되었다. 터널통과구간의 암종분포 현황을 보면 연암 14.4%, 보통암 26.0%, 경암 53.2%로서 상대적으로 암질이 양호한 구간이 많음을 알 수 있으며, XRD 분석결과 팽창성 점토의 함유량은 극미(2.0%이하)하다. 습윤팽창시험에서 안산암은 상대적으로 화강암에 비해 Swell지수가 높으며, 슬레이크에 의한 내구성지수는 안산암의 지수가 다소 높았다. 마모시험시 무게손실은 안산암이 높게 나타나는데 시료에 크랙이나 풍화가 진행되지 않은 것으로 보아 시험부위의 암석구성물질에 마모경도가 높은 물질(예: 석영)의 함유율이 상대적으로 적었던 탓으로 사료된다. 실지로 단층대 주변에서는 굴진성능은 양호하지만, 지보설치의 지연, 암반의 Jamming, 커터헤드(Cutter head)의 걸림과 이로 인한 작업손실등이 발생하며 이로 인하여 순굴진속도(PR, m/hr)은 5.0m/hr에서 심한 경우 0.005m/hr로 시공에 막강한 지장을 준다고 보고된바 있다. (N. Barton, 2000) 반면 RMR>50 이상인 보통~양호한 암반에 대해서는 다음의 상관식으로서 굴진의 척도를 확인할 수 있다.(박철환외, 2000)

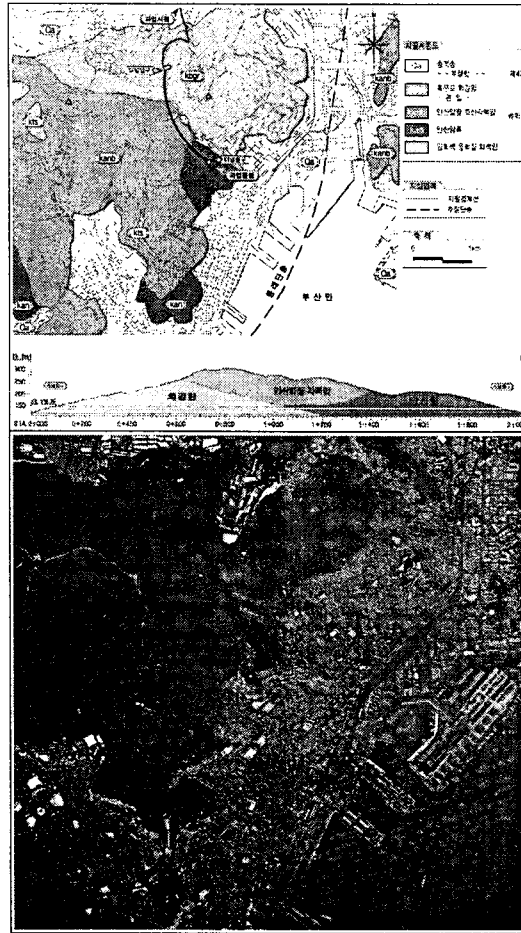


Fig 3. Aerial view(1:20,000) and geologic map on the project area

Table 2. Case study on the TBM tunnelling in Korea

사업명	사업위치	지질특성	시공여건
울산공업용수 수터널 현장	도 경남 양산군 성북면 소로리 ~ 울주군 청양면 중리	안산암(400~1,500 kg/cm ²), 흑운모 화강암(600~2000kg/cm ²)	국내 최대 단층인 동래단층대 및 소규모 단층대 통과
북부도시고속도로 건설공사(3공구)	서울시 종로구 평창동 ~ 성북구 길음동	화강암(GRANITE 650~1,300 kg/cm ²)	대구경 TBM굴착으로 굴진속도 저하 (TBM+NATM확공공법 적용)
북악터널 배수지 터널공사	서대문 홍제3동 산1번지 ~ 성북구 정릉2동 산85-1 일대	화강암 (GRANITE 650~1,235kg/cm ²)	암질이 양호하고 절리의 발달이 적어 굴진효율 좋음
강북정수장 계통 정릉천송수 터널공사	성북구 월곡1동 90번지 ~ 정릉2동 427번지 구간	화강암(GRANITE 1,000~1,500 kg/cm ²) : 암질양호	수직구 굴착후 TBM 굴착
포항권 광역상수 도사업 터널공사	경북 영천시 자양면 ~ 포항시 기계면	응회암(600~1,000 kg/cm ²), 안산암(800~1600kg/cm ²)	암축강도 및 암질양호로 굴진효율 좋음

$$PR = 3.68 - 0.035 \times RMR (R^2 = 0.777) \quad \text{and/or} \quad PR = 2.1 Q_{TBM}^{-0.2} (R^2 = 0.658)$$

결국 전방지질의 불량으로 인한 낙반이나 과도한 균열에 의한 수압용출로 인한 굴진의 방해요인과 순수 무결암으로 기인한 커터헤드의 마모와 교체시간연장으로 인한 공기의 지연은 서로 이율배반적인 역학관계를 가지고 있으므로, 충분한 경험자와 숙련된 기술자에 의한 판단을 원칙으로 하는 경우가 발생하게 된다. 이러한 판단을 수행하는데 밑거름을 제공되는 또 하나의 요소는 이후에 소개될 암반의 재료자체에 대한 특징을 평가하는 것이다.

지질구조적 특성분석

지표면에서 수행하는 스캔라인조사에는 터널구간의 불연속면특성을 평가하는데 한계가 있으므로 BIPS 와 BHTV 에 의한 불연속면 보완 조사 및 분석을 수행하였다. 고각절리에 대한 불연속면 평가시에 주절리의 방향성은 지표조사시에는 Dip Dir./Dip이 각각 292~299/82~84정도이고, 터널구간의 심부조사시에는 Dip Dir./Dip이 111~119/79~80으로 파악되어

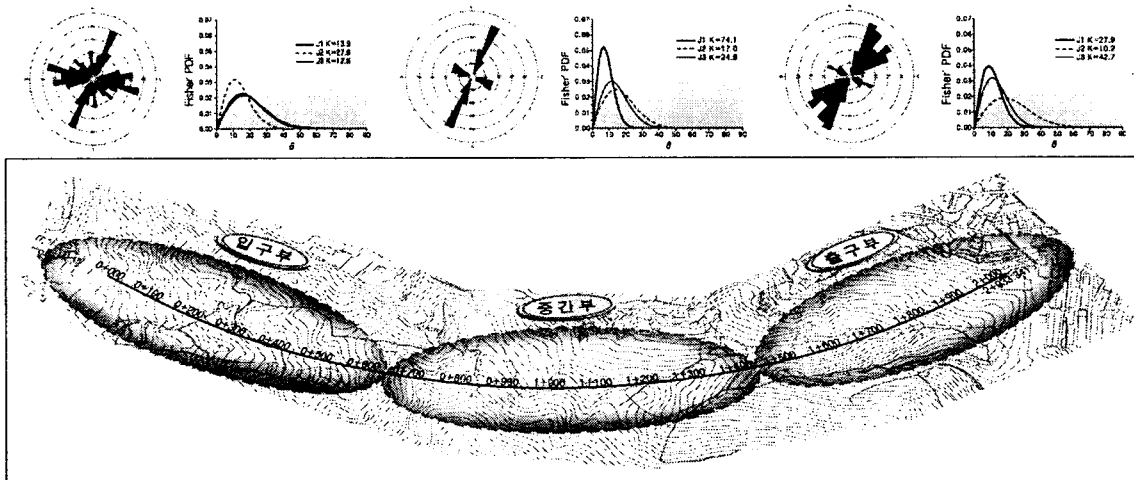


Fig 4. Discontinuity analysis and probability distribution on the selected 3 zones of tunnel region

터널 굴진방향에 대하여는 상당히 양호한 편이다. 수압파쇄시험시 터널축방향과 주응력의 방향은 입출구부에 대해서 각각 75 ° 및 57 °로서 터널굴착시 전방지질의 밀려듬(Squeeze)에 의한 심각한 영향은 없을 것으로 판단하였으며, 축압계수는 국내 일반적인 값의 범주를 벗어나지 않으므로(터널단면방향에 대하여 화강암 1.14~2.31, 안산암 1.81~2.50) 심부 단층 파쇄대를 주변으로 발달한 대규모 편토압발생구간은 없는 것으로 사료된다.(그림 5) 상기의 절리특성과 지하심부암반의 응력시험결과는 지표에서의 선구조분석이나 단층경계부, 암종경계 파악을 위한 지표지질조사결과를 잘 설명해주고 있다. 다만 심도별 축압계수변화는 화강암에서는 노출이 되지만, 안산암에서는 다소 둔화되어 나타나는데 이는 불국사화강암의 관

입사기에 터널심도 암반내에 응력의 교란이 있었던 것임을 시사한다. 화강암과 안산암의 지질공학적 특성은 내구성지수와 습윤팽창시험결과에서도 나타나며 이는 안산암의 풍화특성을 잘 나타내어주며, 터널중점부구간에서 열수변질과 관련된 징후가 발견되어 시공중 Probe drilling에 의한 전방지질확인과 기계굴착에 의한 단면폐합을 추천하였다.

암석재료적 특성분석

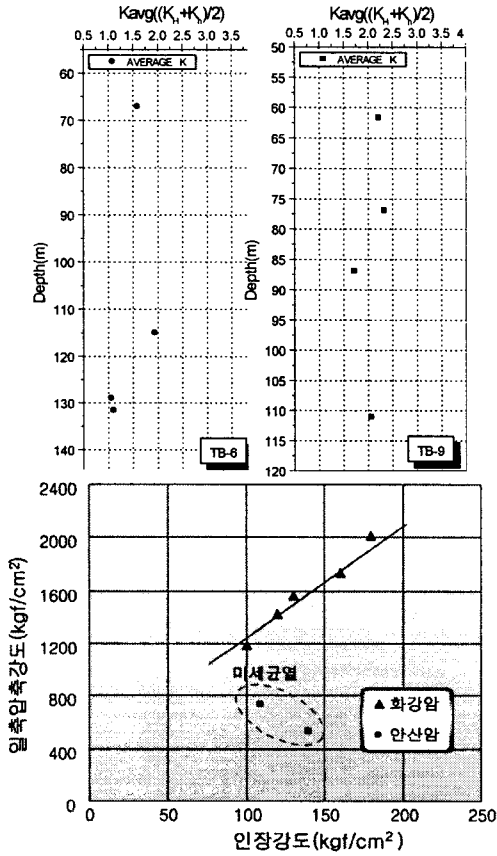


Fig 5. Results of Hydrofracturing & Rock strength test

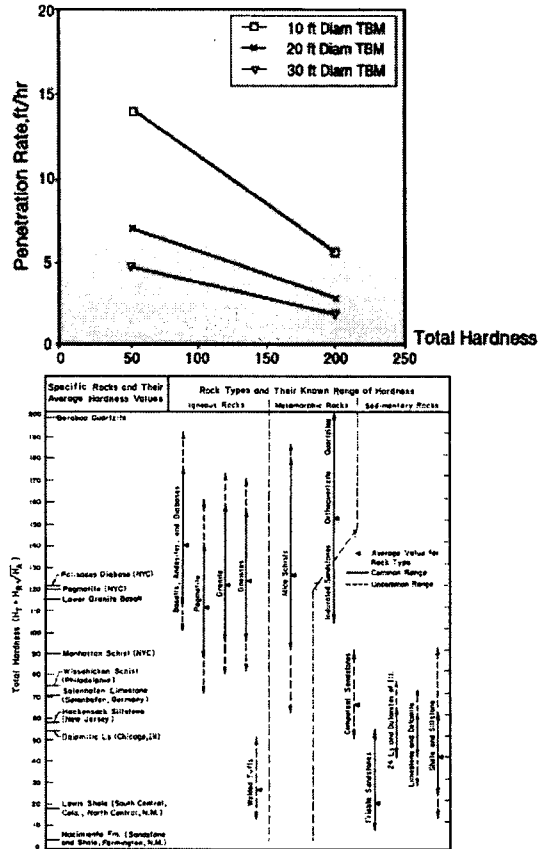


Fig 6. Rebound and Abrasive total hardness and references

암석의 합경도(H_T)는 Schmidt hammer에 의한 반발경도(H_R)와 마모경도(H_A)를 고려한 암반의 물성치로써 TBM의 관입율(penetration rates) 및 cutter 소모율(cutter costs)과의 상관성이 높은 것으로 알려져 있다. 직경 5.6m TBM 굴착과 관련된 암종별 합경도분석에 의하면 순굴진속도는 1.38~1.53m.hr 로서 TBM 적용성이 충분히 타당한 것으로 확인되었으며, 전반적인 시험결과를 살펴보면, 본시험에 의한 합경도(H_T)가 Tarkoy가 제안한 암종별 합경도 분석표(그림 6하)중 중간정도 화강암의 범위와 낮은 정도의 안산암의 범위에 위치하고 있음을 알 수 있다. 앞장에 소개한 바와같이 터널굴착으로 인한 대심도부의 피압대수특성검토나 대규모 용출수 발생구간에 대한 상세검토는 조사자료의 부족과 정확성의 결여로

인하여 본 연구에서는 다루지 않았다. 이외에도 TBM 굴진 적합성검토를 위한 지질공학적 파라미터로서는 암반의 공극율, 탄성과속도, 석영함량, 암석의 이방성, 광물조성에 따른 암반의 변형특성이 등이 있다고 판단되는데, 이러한 부분에 대한 상세한 검토는 보다 장기적인 차원에서 연구계획을 수립하여야 할 것으로 사료된다.

결론 및 토의사항

공학적 지질조사에서 가장 중요한 요소는 먼저 예비답사시에 노출된 과업지역의 지질문제점들을 충분히 숙지하여 각 전문가들이 기술적 과제나 각종 시험법을 면밀히 검토하여 철저한 설계정보를 입수하여야 한다는 점이다. TBM 공법적합성을 검토하기 위한 조사의 난점은 ①TBM 굴착을 위한 지반조건이 너무 무르지도 않고 덜무르지도 않으면서 ②전방지질 밀려듬(Squeeze) 또는 다량의 절리파쇄(Bocky failure)가 발생하지 않는 지질조건을 사전평가하여야 하며 ③합경도 및 복굴절을 등 TBM 관입효율을 평가하는 기법이 국내기술여건으로 매우 한정되어 있다는 점, ④터널 전구간에 대하여 과다용출수구간 파악을 위한 시험법의 도입이 난이한 점, 마지막으로 이러한 기술적인 고려사항외에도 ⑤가동율(utilization)은 TBM 직경과 Backup system의 영향 같은 다양한 변수를 고려할 수 없다는 점 등을 들 수 있다. 이를 극복하기 위하여서는 실지 TBM 적용성을 위한 현장조사기법이 더욱 구체화되어야 하며, 국내의 한계점을 극복하기 위한 적절한 모형의 개발이 시급하다고 보아야 할 것이다.

참고문헌

- 박철환, 신중호, 박찬, 김민규, 정소결, 김화수, 2000, 극경암에서의 전단면터널 굴착속도 분석연구, 터널과 지하공간, pp.526~532
- 부산광역시 상수도사업본부, 2002, 수정산터널 배수지설치공사(TK-1) 구조계산서 III(토질 조사보고서), p.402
- 한국건설기술연구원, 1993, “지하생활공간 개발 요소기술 연구 -지반굴착기술분야(I)-, 정책연구보고서, pp.1-4~1-127
- Barton, Nick, 2000, TBM tunnelling in jointed and faulted rock, Balkema/Rotterdam/Brookfield, p.173
- Barton Nick, 1999, General report concerning some applied century lessons and 21st century challenges in applied rock mechanics, safety and control of the environment, 9th Int'l Congress on Rock mechanics, pp.1~21
- Tarkoy, P. J. & Marconi, M. 1991, Difficult rock comminution and associated geological conditions. Proc. 6th Int'l Symp : Tunnelling '91, London, pp.195~207, Elsevier