

TECHNICAL NOTES

광물과 에너지자원 개발을 위한 TBM 활용사례

고태영^{1*}, 최성웅²

¹강원대학교 에너지자원·산업공학부 에너지자원공학전공 조교수, ²강원대학교 에너지자원·산업공학부 에너지자원공학전공 교수

Application of TBM for Mining and Energy Resources Development

Tae Young Ko^{1*} and Sung-Oong Choi²

¹Assistant Professor, Department of Energy and Resources Engineering, Kangwon National University

²Professor, Department of Energy and Resources Engineering, Kangwon National University

*Corresponding author: tyko@kangwon.ac.kr

Received: December 14, 2021
Revised: December 17, 2021
Accepted: December 20, 2021

ABSTRACT

A TBM is an equipment that excavates a tunnel with a full face by rotating a circular cutter head and its advantages are fast excavation rate and safe construction. A TBM, which is primarily used for tunnel excavation on civil construction sites, is easily adaptable to information and communication technology. Research related to unmanned and automated technology is being actively pursued. TBM applications for mining and energy resource development in other countries were investigated in this study. The difference of TBM applications between the mining and energy resource development and civil construction sites was examined. Technical factors such as geological conditions, depth, site access, TBM launching, alignment and inclination, TBM size, and others that should be considered when choosing a TBM were investigated. Finally, the advantages and disadvantages of TBM application in mines and the technical requirements for TBM for successful mine application are summarized.

Keywords: TBM, Mine development, Geological condition, Mining

초록

TBM은 원형의 커터헤드를 회전하여 전단면으로 터널을 굴착하는 장비로 빠른 굴진속도와 안전한 시공이 장점이다. 건설현장에서 터널 굴착에 주로 사용되는 TBM은 정보통신기술의 적용이 용이한 장비로서 현재 무인화 및 자동화에 관련한 연구가 활발히 진행 중이다. 본 연구에서는 국외에서의 광물 및 에너지 자원 개발을 위한 TBM의 적용 사례를 살펴보고, 광물 및 에너지 자원 개발과 토목 건설현장에서 TBM 적용에 대한 차이를 살펴보았다. 그리고, TBM 선정 시에 기술적으로 고려해야 하는 지질조건, 심도, 현장 접근, 발진, 선형과 경사, TBM 크기 등을 알아보았다. 마지막으로 광산에서 TBM 적용 시의 장점과 단점 및 성공적인 광산 적용을 위하여 TBM이 기술적으로 갖추어야 하는 사항을 정리하였다.

핵심어: 전단면터널굴착기, 자원개발, 지질조건, 광업

1. 서론

TBM은 장비의 가장 앞부분인 원형의 전단면 커터헤드(cutterhead)에 디스크 커터나 비트 등의 굴착도구를 장착하여 커터헤드를 회전과 동시에 큰 수직력을 가하여 디스크 커터를 암반에 밀착시켜 구르는 동안 커터 링의 하부에 균열을 생기게 하여, 암반을 파



왜하여 굴진한다. 건설현장에서 터널 굴착에 주로 사용되는 TBM은 정보통신기술의 적용이 용이한 장비로서 현재 무인화 및 자동화에 관련한 연구가 활발히 진행 중이다 (Shahrouf and Zhang, 2021, Sebbeh-Newton et al., 2021). TBM의 높은 굴진율과 안전성은 심부 광체로의 접근을 위한 접근 터널의 고속 굴착을 가능하게 하며, 실시간으로 제공되는 여러 가지의 기계 데이터들은 터널 굴착의 자동화와 무인화의 기초자료로 사용된다.

일반적으로 노천이나 천부에서의 채굴이 완료되면 보다 깊은 심부로의 채굴이 이어진다. 대심도의 광체에 접근하기 위한 수단으로 수직갱이나 사갱이 필요하며, Fig. 1과 같이 국외에서는 이러한 사갱을 굴착하는 데 TBM을 적용하는 사례가 증가하고 있다 (Home and Askilrud, 2011, Terbovic and Luxner, 2012, Brox, 2013, Zheng et al., 2016).

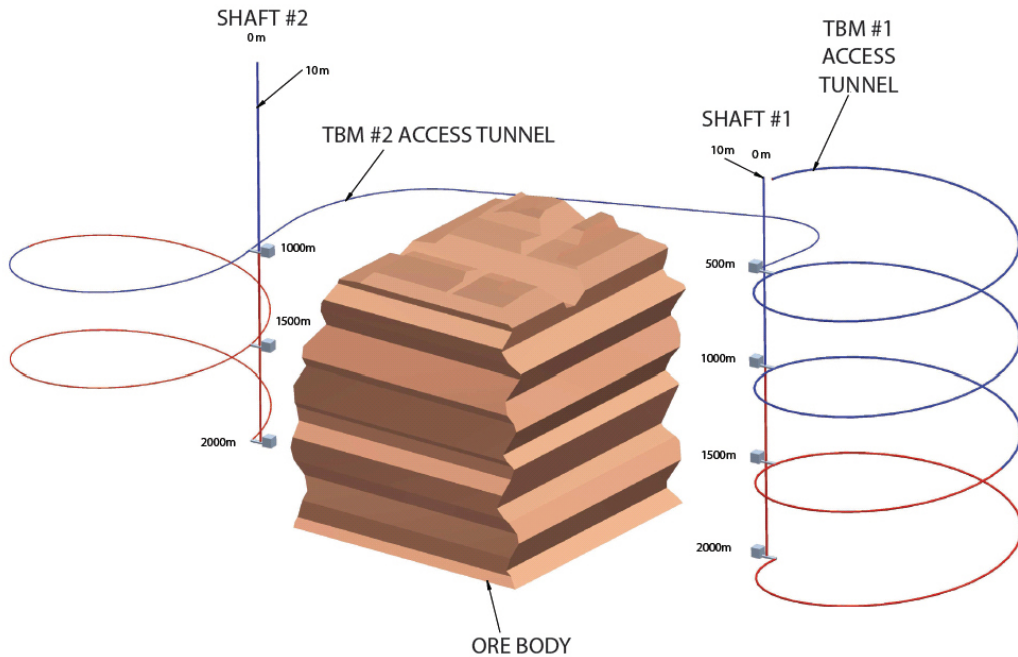


Fig. 1. A mine access to reach a deep ore body by TBM tunnel (Ofiara , 2017).

Cigla et al.(2001)은 TBM 굴착이 발파공법이나 다른 굴착공법에 비해 작업자의 안전성 향상, 지반교란 최소화, 매끄러운 터널 단면 생성, 균일한 크기의 버력반출, 연속 작업이 가능한 점 등이 우수하다고 하였다.

본 연구에서는 광물 및 에너지 자원 개발을 위한 국외의 TBM 적용사례를 살펴보고자 한다. 광물 및 에너지 자원 개발과 토목 건설현장에서 TBM 적용에 대한 차이를 살펴보고, 광산에서 사용할 TBM 선정 시에 기술적으로 고려해야 하는 지질조건, 심도, 현장 접근, 발전, 선형과 경사, TBM 크기 등을 알아보았다. 마지막으로 광산에서 TBM 적용 시의 장점과 단점 및 성공적인 광산 적용을 위하여 TBM이 기술적으로 갖추어야 하는 사항을 정리하였다.

2. 광물 및 자원 개발을 위한 국외의 TBM 적용사례

광물 및 자원개발에서 TBM을 가장 먼저 적용한 것은 1950년대 후반으로 거슬러 올라간다. 그 후 1960년대와 1970년대에 지하

채굴 작업에서 여러 번 시도되었다. 광산에서 TBM의 초기 사용은 탐사 터널 및 광산 개발, 또는 광산 확장의 일부로 탐사 및 새로운 접근을 완료하기 위해 빠른 굴착이 필요한 접근 터널 건설을 위한 것이었다. 초기 광산에서의 TBM 적용에서 발견된 문제점은 다음과 같다(Brox, 2013). 첫째, 낮은 작용력을 가진 소형의 디스크 커터를 사용하여 강도가 높은 암반에서의 저조한 굴진율을 기록하였고, 둘째, TBM 장비에서 사용되는 파워가 충분하지 못하여 성능을 최대로 끌어내지 못하였으며, 셋째, 파쇄대나 단층대 등의 예상치 못한 지반 굴착에 적절하게 대처하지 못해 굴진율이 저하되었고, 넷째, 지반조건에 맞지 않은 부적절하게 제작된 TBM을 직경 등의 크기 개조 후 다른 광산에 적용하였고, 다섯째, 경험이 부족한 인력에 의해서 운영과 유지보수에 미숙하여 매우 낮은 가동률을 나타내었다는 것이었다.

1990년대 이후 광산에서 TBM의 적용은 획기적인 개선을 가져왔다. 이는 수십 년 동안 TBM을 다양한 광산 프로젝트에 적용하면서 얻은 경험이 축적되었고, TBM 커터헤드 설계 개선, TBM 구성요소, 유압 및 전기 시스템의 새로운 기술적 발전 그리고 컴퓨터 및 전자 제어 장치 사용의 증가 때문이다. 다음의 Table 1에 광물 및 자원개발에 TBM이 적용된 주요 사례를 나타내었다.

Table 1. Examples of applications of TBM in mining projects (Brox, 2013)

Project	Location	Year	Length, km	Size, m
Step Rock Iron	Canada	1957	0.30	2.74
Nchanga	Zambia	1970	3.2	3.65
Oak Grove	USA	1977	0.20	7.4
Blyvoor	South Africa	1977	0.30	1.84
Blumenthal	Germany	1979	10.6	6.5
Westfalen	Germany	1979	12.7	6.1
Donkin Morien	Canada	1984	3.6	7.6
Autlan	Mexico	1985	1.8	3.6
Stillwater EB	USA	1988-1991	6.4	4
Rio Blanco	Chile	1992	11.0	5.7
San Manuel	USA	1993	10.5	4.6
Cigar Lake	Canada	1997	20	4.5
Port Hedland	Australia	1998	1.3	5.0
Stillwater EB	USA	1998-01	11.2	4.6
Mineral Creek	USA	2001	4.0	6.0
Monte Giglio	Italy	2003	8.5	4.9
Los Bronces	Chile	2009	8.0	4.2
Stillwater Blitz	USA	2012-13	6.8	5.5
Grosvenor Coal	Australia	2013	1.0	8.0
Oz Minerals	Australia	2013	11	5.8
Northparkes	Australia	2013	2.0	5.0
El Teniente	Chile	2014	6.0	10.0

Zheng et al.(2016)은 광산에 사용되었던 TBM의 일반적인 요약을 Fig. 2와 같이 나타냈다. 여기서 큰 원은 더 큰 TBM 직경을 나타내고 수평선은 1990년 이전과 이후의 금속광산 및 석탄광의 평균 TBM 터널 길이를 나타낸다. Fig. 2에 의하면 수십 개의 TBM 프로젝트가 수행된 1970년대에 광업에서의 TBM 적용이 최대로 많았음을 알 수 있다. 1980년대부터 특히 석탄광(coal

mine)에서의 TBM 적용이 급격히 감소하였다. 석탄광에서의 TBM 사용의 감소는 석탄채굴의 비중이 높은 노천 채광 장비의 발전과 노천에서 채굴한 저품위 석탄 광체의 처리 기술의 발달에 기인하여 노천 채굴 위주로 채광이 이루어졌기 때문이다. 1990년대 이후로는 금속광산을 중심으로 다시 TBM의 사용이 증가하였다. 특히 TBM의 직경과 터널의 길이가 이전에 비해서 증가한 것을 볼 수 있다.

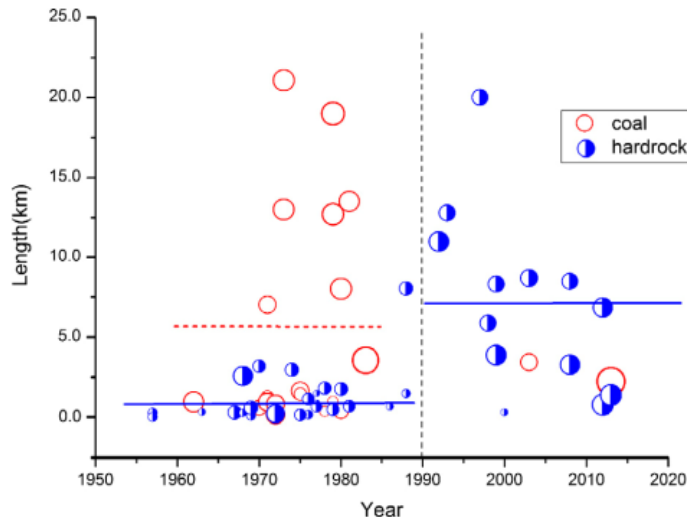


Fig. 2. TBM tunnelling in mines (Zheng et al., 2016)

3. 광물 및 자원 개발과 토목 건설현장에서 TBM 적용에 대한 차이

광물 및 자원개발에서 TBM은 지하 광체에 접근하거나 광체를 탐사하는 데 사용할 수 있다. 셰일 가스, 천연 가스 및 석유와 같은 에너지 자원 개발에는 다른 굴착 기술(수직 및 경사 시추공 굴착)이 사용되며 일반적으로 이러한 시추공 굴착에는 TBM이 필요하지 않다. 광체의 기원과 형성과정, 그리고 심부에 매장된 형태를 고려하면, TBM을 이용한 직접적인 채광은 다소 어렵다. 그 이유는 광체가 모암에 분포하는 형태는 다양하고 지하광산에서의 갱도는 이러한 광체를 따라 가면서 굴착되는데, TBM의 경우는 TBM의 본체와 후방설비 대차의 길이 등으로 인해서 광체를 따라 가면서 굴착하기가 쉽지 않기 때문이다. 광상의 복잡한 지질학적 조건을 감안할 때 대심도 광산의 TBM 터널은 상대적으로 균일한 지반 조건을 가진 얇은 깊이의 토목 건설현장에서의 TBM 터널보다 더 어렵다. 복잡하고 어려운 지반조건은 금속광산에서 만날 가능성이 더 크다. 석탄광산 경우의 지질학적 위험은 주로 연약 지반, 지하수 유입 및 메탄가스 폭발로 인한 것이다. 초기 금속광산 및 석탄광산에서 사용된 TBM의 대부분은 개방형 그리퍼 TBM이며, 이는 주로 지하수 유입이 없는 보통암 정도의 강도를 가진 암석에 적합하기 때문에 파쇄대나 단층대의 조우는 TBM 터널에 큰 문제를 야기하였다. Table 2에 토목 건설현장 및 광산에서의 TBM 터널 굴착의 비교를 나타내었다. 지질적인 차이 외의 다른 측면에서도 토목 건설현장 및 광산에서의 TBM 터널 굴착은 다르다. 대심도 광산에서는 TBM 터널 굴착 전에 상세한 지반조사 수행이 어렵고, 광산의 특성상 도심지에서 멀리 떨어져 있거나, 도로가 개설되지 않은 곳에 위치할 수 있기 때문에 현장준비와 물류 공급이 어렵다는 단점이 있다. 또한 토목 건설현장에 비해서 광산에서는 숙련되고 경험이 풍부한 TBM 작업자가 부족하고, 발주자의 TBM에 대한 경험이 부족하여 TBM 도입을 꺼릴 수도 있다.

Table 2. Comparisons of TBM tunnelling in civil and mining projects (Zheng et al., 2016)

Parameters	Civil	Mining
Number of TBMs	Over 10,000	Around 100
Types of TBMs	All types	Mainly grippers
Maximum TBM diameter (m)	17.6	8
Maximum bored length (km)	13.5	50
Maximum advance rate (m/month)	2163	1627

4. 광산에서 사용할 TBM 선정 시 기술적 고려 사항

4.1 지질조건

개방형 TBM은 150 MPa에서 250 MPa까지의 일축압축강도를 가진 균질한 암석 굴착에서 다른 굴착공법과 비교하여 높은 굴착 효율을 기대할 수 있다. 극경암이나 절리가 거의 없거나, 마모도가 높은 암석의 굴착에서는 굴진율의 저하가 발생할 수 있으나, 19 인치 이상의 디스크 커터의 적용과 더 큰 파워의 사용으로 굴진율의 향상을 기대할 수 있다. 특히 광산에서 주로 적용되는 개방형 TBM은 또한 단층/전단 또는 파쇄대 등과 같은 지질이상대가 상대적으로 적은 터널에서 가장 적절하게 적용될 수 있다. 개방형 TBM은 관리할 수 없는 양의 지하수가 유입되면 TBM의 굴진에 큰 영향을 미치기 때문에 파쇄대나 절리가 다수 발달되어 지속적인 지하수 유입이 발생하는 지질에서는 적합하지 않다. TBM의 광산 적용 시에 예상되는 지질조건에 대한 상세한 검토가 요구된다.

4.2 심도

광산에서의 TBM 적용에 대한 주요 고려 사항 중 하나는 터널 선형에 따른 토피고와 과지압의 발생 가능성에 대한 평가이다. 과지압은 토피고가 크고(대심도), 암석의 강도가 낮고, 현지응력이 매우 높을 때 주로 발생한다. 과지압의 발생 가능성의 평가는 암석의 일축압축강도와 현지응력으로부터 가능하다. TBM은 일반적으로 낮은 암석 강도 및 높은 현지 응력으로 인해 광범위한 지역에서 과지압을 받을 수 있는 대심도 장대 터널에 적합하지 않은 것으로 알려져 있다. 이러한 과지압 조건에서는 작업자의 안전에 영향을 미치는 암반파열(rockburst)이 발생할 가능성이 있다. 개방형 TBM의 경우 커터헤드의 제한된 영역만 보호를 할 수 있는 루프 쉴드만 일반적으로 설치되어 있다. 암반파열과 같은 과지압 문제에 대한 보강 방법으로는 Fig. 3과 같은 MaNally 보강이 적용될 수 있다. MaNally 보강은 여러 가닥의 철근을 엮어서 터널의 종방향으로 설치한 것으로 지점(지지구조)은 강지보재를 이용한다.

4.3 현장접근

TBM 장비를 실질적으로 현장에 반입할 수 있도록 적절한 부지 접근이 가능하고, 접근 도로가 있는 현장을 고려해야 한다. 중대형 TBM(직경 8~10m급)의 무게는 130 ton을 초과할 수 있으며, TBM의 현장 조립을 위해서 특수 차량을 이용하여 운송한다. 만약에 도로를 통한 운반이 어려운 산악지형이나 원격지역의 경우 헬리콥터에 의한 운송을 고려할 수 있으나, 최대 적재 하중이 20 ton으로 제한되기 때문에 TBM을 더 작은 단위로 분해하거나, 직경이 작은 TBM만 적용이 가능하다.



Fig. 3. McNally TBM support system (Brox, 2013)

4.4 TBM 발진

TBM 조립과 발진 터널을 위해 넓은 폭의 챔버를 굴착할 수 없다면 TBM 조립을 용이하게 하는 충분한 면적이 터널 갱구 근처에 있어야 한다. 터널 갱구는 비탈면의 바닥부에 위치하게 되어 낙석 또는 사태의 위험이 존재할 수 있다. 광산 현장 주변의 암석 상태에는 표면 근처에서 광범위한 풍화 작용과 함께 고도로 변질된 기반암이 포함될 수 있다. 이러한 상황에서 안전한 터널 건설을 위한 갱구 준비를 위해 대규모 굴착이 필요할 수 있다. TBM 발진을 위한 동굴은 기존 지하 광산 내에서 굴착될 수 있다. Fig. 4에 칠레 El Teniente 광산에서의 TBM 발진 챔버와 Los Bronces 광산에서의 조립 챔버의 예를 나타내었다.



(a)



(b)

Fig. 4. TBM launching and assembly chamber. (a) El Teniente mine, (b) Los Bronces mine (Brox, 2013)

4.5 TBM 선형과 경사

TBM의 수직 선형은 최대 경사 3% 이내로 유지하는 것이 일반적이나, 그 이상의 경사에서는 특별한 제동 시스템을 필요로 한다.

수평 선형의 경우에도 제한이 있는데, 일반적으로 최소 곡률반경이 대략 250~300 m이다. 이 이상의 급격한 곡선을 필요로 할 때는 중절 장치를 장착하거나 TBM의 길이를 작게 해야 한다. TBM 터널 선형은 추가 지반 보강을 최소화하기 위해 낮은 강도의 암석, 단층대 및 파쇄대를 피할 수 있도록 계획하는 것이 유리하다. 토목 건설현장의 수력발전 경사갱 굴착이나 Fig. 5(b)에서 보이는 러시아 상트페테르부르크 지하철처럼 지상에서 지하철 역사로 접근하는 접속 터널의 경우 최대 45도의 경사로 TBM을 이용하여 굴착한 사례도 있다. 따라서 광산에서의 접근 터널도 이와 유사하게 최대 45도의 경사까지는 상향이나 하향으로 굴착이 가능하다. Fig. 5에 상향과 하향의 TBM 발진에 관련한 예를 나타내었다.



(a)



(b)

Fig. 5. TBM launching inclination. (a) Upward-inclined TBM setup, (b) Downward-inclined TBM setup (Brox, 2013)

4.6 TBM 크기

광산에서의 TBM 적용과 관련된 주요 문제 중 하나는 터널의 목적에 따른 초기 및 최종 지보재 설치를 위한 충분한 공간이 확보되고 내부 여유 공간 요구 사항을 충족하는 최소 허용 터널 직경을 결정하는 것이다. 최소 허용 터널 직경을 결정할 때는 터널 내부 여유 공간 요구 사항, 지보 설치 후의 최대 내경, 그리고 연약대나 파쇄대에서 최대 터널 내공 변위량을 반영해야 한다. 일반적으로 4 m 정도의 TBM 직경은 위에서 언급한 요구 조건을 만족한다고 볼 수 있다.

4.7 물류공급

물류공급의 측면에서 보면 광산 현장에서 TBM을 사용하기 위해 고려해야 할 주요한 사항은 전력 가용성이다. TBM의 크기에 따라 사용되는 전력량은 다른데 일반적으로 직경 4 m급의 TBM은 1.5 MW의 전력이 필요하고, 8 m급의 TBM은 8 MW의 전력이 필요하다. 전력을 주변의 전력망으로부터 수전이 가능하면 수전을 통한 전력공급이 이루어지도록 한다. 인근에서 수전할 전력망이 없다면 디젤 발전기를 이용한 전력생산이 필요하다. 일반적으로 수전을 통한 전력공급이 디젤 발전기를 이용한 자체 발전보다 비용이 적게 든다.

5. 성공적인 광산 적용을 위한 TBM의 기술적 사항

광산에 TBM을 적용할 경우 얻을 수 있는 장점은 첫째, 일반적으로 양호한 암반 조건에서 매우 높은 굴진 속도를 얻을 수 있고, 둘째, 터널 단면 및 주변에 대한 손상을 최소화하기 때문에 지보량을 최소화할 수 있고, 셋째, 굴착 시 분진 발생이 적으므로 추가적인 환기를 위한 팬 등의 설치를 최소화할 수 있으며, 넷째, 발파 시 발생할 수 있는 분진이나 가스나 연기 등이 없기 때문에 작업자의 건강에 대한 위험성을 줄일 수 있다. 그러나, 다음과 같은 단점도 발생할 수 있다. TBM 터널의 형상은 원형으로 국한되어 필요없는 사공간의 발생이 생길 수 있고, 광체를 따라 굴착해야 하는 광산의 경우와 같은 급곡선의 시공이 어려우며, 파쇄대나 단층대를 조우할 경우 지보에 소요되는 시간이 증가하여 전체적인 굴진율이 떨어지며, 지하수 유입을 막기 위한 사전 그라우팅의 작업을 병행해서 굴착할 경우 가동률의 저하를 초래한다.

광산에서 효과적인 TBM 굴착을 위해서는 다음과 같은 점을 기술적으로 고려해야 한다. 일축압축강도 250 MPa 이상의 암반 굴착을 위한 충분한 TBM 파워를 확보하고, 고성능 디스크 커터를 장착하고, 내마모성이 뛰어난 재료를 커터헤드에 적용하며, 단층대나 파쇄대 굴착 시 터널 내부로의 과대한 변위 발생을 대처하기 위한 과굴착이 가능하도록 커터헤드를 설계해야 한다. 마모된 디스크 커터의 교체 위한 TBM 내부에서의 이동 공간을 충분히 확보하고, 록볼트 및 슛크리트 이외에 링빔 및 철망 설치를 가능하도록 하며, 원활한 사전 그라우팅 작업이 가능하도록 최소 전방 30m 이상 천공이 가능한 천공기를 장착해야 한다. 또한 급곡선 굴착이 가능하도록 중절 장치를 설치하며, 개방형 TBM 뿐만 아니라 필요에 따라서는 싱글 쉴드 또는 토입식 쉴드 TBM을 적용하여 세그먼트 라이닝을 최종 지보재로 활용할 수도 있을 것이다.

6. 결론

본 연구에서는 광물 및 에너지 자원 개발을 위한 국외의 TBM 적용 사례를 살펴보았다. 1970년대에 광업에서의 TBM 적용이 최대 많았으나, 1980년대부터 특히 석탄광(coal mine)에서의 TBM 적용이 급격히 감소하였다. 1990년대 이후로는 금속광산을 중심으로 다시 TBM의 사용이 증가하였다. 특히 TBM의 직경과 터널의 길이가 이전에 비해서 증가한 것을 볼 수 있었다.

광물 및 에너지 자원 개발과 토목 건설현장에서 TBM 적용에 대한 차이를 살펴보았다. 지질적인 차이 이외의 다른 측면에서도 토목 건설현장 및 광산에서의 TBM 터널 굴착은 다르다. 광산에서 사용할 TBM 선정 시에 기술적으로 고려해야 하는 사항을 지질조건, 심도, 현장 접근, 발진, 선형과 경사, TBM 크기 등의 관점에서 알아보았다. 마지막으로 광산에서 TBM 적용 시의 장점과 단점 및 성공적인 광산 적용을 위하여 TBM이 기술적으로 갖추어야 하는 사항을 정리하였다. 고성능 디스크 커터, 다양한 지보 설치 기구의 설치, 과굴착이 가능한 커터헤드 설계, 내마모성이 강한 재료의 사용, 중절장치 등의 적용은 광산에서의 TBM 굴진을 향상에 기여할 것이다.

사사

본 연구는 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 해외자원개발협회의 지원(스마트 마이닝 전문 인력 양성)으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Brox, D., 2013, Technical considerations for TBM tunneling for mining projects, *Trans. Soc. Mining Metall. Explor.* 334, 498 – 505.
- Cigla, M., Yagiz, S. and Ozdemir, L., 2001, Application of tunnel boring machines in underground mine development, *Proc. International Mining Congress*, Ankara, Turkey.
- Home, L. and Askilsrud, O.G., 2011, Tunnel boring machines in mining. *SME Mining Engineering Handbook*, third ed. SME, USA, pp. 1255-1270.
- Ofiara, D., 2017, What's New, What's Next: TBM Equipment for the Mining Industry, <https://www.robbinstbm.com/tbm-equipment-mining-industry/>
- Sebbeh-Newton, S., Ayawah, P.E., Azure, J.W., Kaba, A.G., Ahmad, F., Zainol, Z. and Zabidi, H., 2021, Towards TBM automation: On-the-fly characterization and classification of ground conditions ahead of a TBM using data-driven approach, *Appl. Sci.*, 11, 1060.
- Shahrour, I. and Zhang, W., 2021, Use of soft computing techniques for tunneling optimization of tunnel boring machines, *Underground Space*, 6(3), 233-239.
- Terbovic, D. and Luxner, T., 2012. Reef mining using tunnel boring machines in Nye, Montana. *Proc. North American Tunneling 2012*. SME, Indianapolis, Indiana, USA, pp. 46-53.
- Zheng, Y.L., Zhang, Q.B. and Zhao, J., 2016, Challenges and opportunities of using tunnel boring machines in mining, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 57, 287-299.