

토사지반과 핵석이 포함된 복합지반에서 실드TBM 굴진 시 장비부하에 관한 연구

김기환^{1*} · 김 혁² · 문철화³ · 김용휴⁴ · 김동호⁵ · 이재용⁶

¹정회원, (주)삼보기술단 부장

²정회원, (주)삼보기술단 상무

³정회원, (주)삼보기술단 전무

⁴비회원, (주)삼보기술단 차장

⁵비회원, (주)삼보기술단 대리

⁶비회원, (주)삼보기술단 주임

A study on the machine load on shield advancing between soil ground and mix ground included core stone

Ki-Hwan Kim^{1*} · Hyouk Kim² · Cheol-Hwa Mun³ · Young-Hyu Kim⁴ · Dong-Ho Kim⁵ ·
Jae-Yong Lee⁶

¹General Manager, Geotechnical Business Division, Sambo Engineering Co., Ltd.

²Managing Director, Geotechnical Business Division, Sambo Engineering Co., Ltd.

³Senior Managing Director, Geotechnical Business Division, Sambo Engineering Co., Ltd.

⁴Deputy General Manager, Geotechnical Business Division, Sambo Engineering Co., Ltd.

⁵Assistant Manager, Geotechnical Business Division, Sambo Engineering Co., Ltd.

⁶Senior Staff, Geotechnical Business Division, Sambo Engineering Co., Ltd.

*Corresponding Author : Ki-Hwan Kim, kihwan@daum.net

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
20(6)1039-1048(2018)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.6.1039>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received September 10, 2018

Revised October 4, 2018

Accepted October 12, 2018



This is an Open Access article
distributed under the terms of the
Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2018, Korean Tunnelling and Underground
Space Association

Abstract

In urban tunnel construction, most of the Shield TBM method is applied to secure the safety of buildings and to minimize risks. On the other hand, in the urban development process, landfills are often embanked or improving in many cases, so that the boundary between the surface and the rock is often heterogeneous. In case of ground condition such as alluvial soil, granite, decomposed granite, core stone and rock with various layers, datas on shield TBM advancing according to each ground condition are analyzed, The characteristics of machine load were compared and analyzed. As a result, it can be predicted that the change of ground condition can be predicted by the tendency of discharge volume, thrust force and cutting wheel torque when the cutter is checked and replaced regularly on advancing under maintaining the design slurry pressure.

Keywords: Shield, Tunnel Boring Machine, Soil, Core stone, Granite

www.kci.go.kr

초 록

도심지 터널공사에서는 주변 건물의 안전성을 확보하고, 민원을 최소화할 수 있는 쉴드TBM 공법이 대부분 적용되고 있다. 도심지에는 기존의 택지를 매립조성하거나 개량하는 경우가 많기 때문에 지표에서부터 암반 경계부까지는 불균질한 상태로 이루어지는 경우가 많다. 이와 같이 토사지반, 파쇄정도가 다양한 화강암지반, 핵석층, 암층과 같이 복잡한 지반 조건에서 쉴드TBM으로 터널구조물을 구축하는 경우, 각 지반조건에 따른 쉴드TBM에 나타나는 기계데이터를 분석하여 지반조건에 따른 장비부하의 특징을 비교분석하였다. 그 결과, 설계막장압을 유지하면서 굴진하고, 주기적으로 커터를 점검하여 교체하는 경우, 배토량, 추력, 커터토크의 경향으로 지반조건의 변화를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어: 쉴드, TBM, 토사, 핵석, 화강암

1. 서론

해안가 또는 하천 부근에 조성되는 도심지의 개발과정은 기존의 택지를 매립하여 조성하거나 개량하는 경우가 많기 때문에 완료된 이후에는 지표에서부터 암반층까지는 불균질하고 복잡한 상태로 구성되는 경우가 대부분이다. 이러한 도심지 지하에 지하철, 전력구, 도로, 공동구 등 터널구조물을 구축하는 경우에는 주변 건물의 안전성을 확보하고, 민원과 각종 리스크를 최소화할 수 있는 쉴드TBM을 이용한 터널공사가 대부분 적용되고 있다. 본 연구대상지역인 경우에도 이러한 도심지 터널공사에 있어서 토사지반, 파쇄정도가 다양한 화강암지반, 핵석층(Core Stone), 암층과 같이 복잡한 조건(Kim et al., 2017; MTR Corporation Limited, 2011a)으로 구성된 구간으로 시공 시 1대의 쉴드TBM으로 굴진이 이뤄지면 다양한 굴진면에 조우할 수밖에 없다.

따라서 현재 통과구간에 대해 입찰안내서 당시 조사된 지층조건(MTR Corporation Limited, 2011b)과 대비하여 굴진상황을 판단하고, 기계의 부하관계를 분석함으로써 향후에 조우하게 되는 전방의 지층조건을 보다 쉽게 판단하고 장비를 운전하기 위해 비교분석의 자료로 활용하였다.

2. 지반조건

본 연구에서 비교분석하고자 하는 터널구간은 직경 7.4 m의 이수식 쉴드TBM으로 연장 865 m구간을 Fig. 1에 나타내는 복합지반으로 구성된 종단계획에 따라 굴진해야 하며, 지반조건을 Table 1에 나타내었다.

터널구간의 지층구성은 매립층, 해성 충적층과 홍적층, 파쇄의 정도가 다양한 화강암지반, 핵석층, 암반층의 순서로 구성되어 있다. 지하수위는 0~5 m에 분포하고 있다.

매립층의 경우, 상부 0~5 m의 범위로 N값 5~50, 투수계수는 약 4×10^{-4} m/sec으로 조사되었다. 매립층의 하부에는 약 20 m까지는 N값은 5~80, 투수계수는 약 2×10^{-5} m/sec의 제4기 충적층과 홍적층이 혼재되어 있는 지층이 분포하고 있으며, 약 50 m까지는 투수계수가 약 2×10^{-5} m/sec의 파쇄정도가 다양한 화강암층이 존재하고 있다. 전반적으로 매립층부터 파쇄정도가 다양한 화강암층은 충적점토와 실트, 점토가 혼재되어 있으며, 자갈을 포함

하고 있는 것으로 조사되었다. 또한 약 0.2 m³의 핵석이 토사와 혼합되어 불균질하게 분포하고 있는 것으로 조사되었으나 쉴드TBM이 발전하는 정거장의 터파기 공사중 지름 약 1m의 핵석이 출현하는 등 핵석의 크기를 정량적으로 예측하기 어려웠다. 한편 조사결과로부터 파쇄대는 파악되지 않고 있었다.

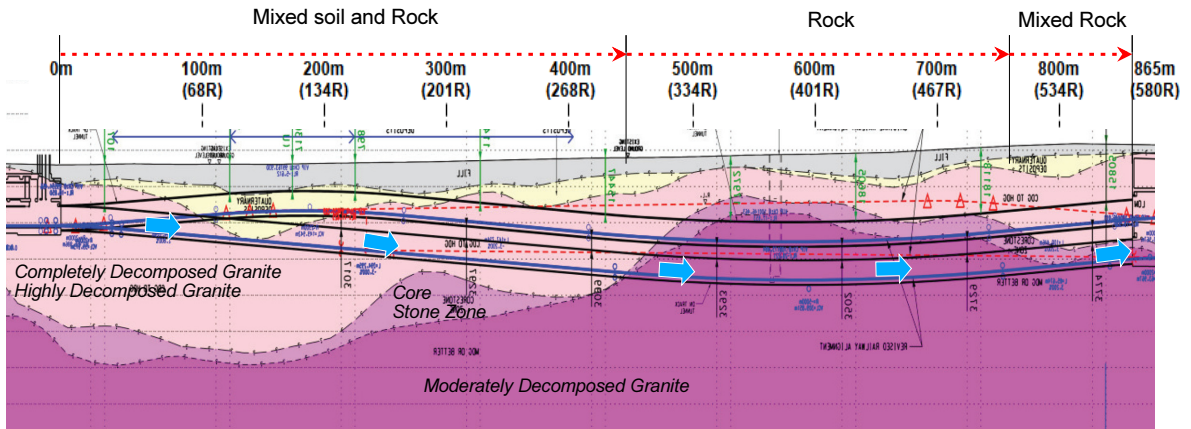


Fig. 1. Longitudinal geology condition and tunnel alignment

Table 1. Geology conditions for tunnel phase

Division			N value	Permeability (m/sec)
(0~5 m)	Fill	Mixed alluvial clays, silts, sands and occasional gravels	5~50	4×10^{-4}
(0~20 m)	Quaternary deposits		5~80	2×10^{-5}
(0~50 m)	Completely decomposed granite highly decomposed granite		-	2×10^{-5}
Core stone zone		A discrete body of rock which exceeds 0.2 m ³ and is contained in a soil matrix	Max. UCS 246 MPa	-
Moderately decomposed granite		Granite		-

3. 쉴드TBM 굴진에 있어서 기계데이터의 검토

쉴드TBM 굴진에 있어서 기계데이터를 수집한 터널연장은 총 856 m로서 쉴드TBM 발전부에서 약 430 m는 먼저 파쇄정도가 다른 화강암과 조우하며 이후 제4기 층적층이 존재하는 토사와 암반으로 구성된 복합지반을 지나 하부에 핵석이 분포하는 구간을 통과한다. 이후는 약 300 m의 암반구간을 통과하면, 126 m의 하부에는 암반이 존재하고 중간부와 천단부에는 파쇄정도가 다른 화강암과 핵석이 존재하는 복잡한 지층구조를 통과한 후 정거장에 도달한다.

상술한 바와 같이 터널구간은 복잡한 지층조건과 강도특성을 가지고 있으므로 장비형식은 막장의 압력관리가

용이한 이수식 쉘드TBM을 적용하였고, 이수압력은 공기압으로 제어하며, 굴착한 버력을 사전에 파쇄하여 폐색을 방지하기 위해 배니관의 전방에 크러셔를 설치하였다. 또한 다양한 지층조건과 통과 심도도 변화하기 때문에 굴진 1링(세그먼트 폭 1.5 m) 마다 설계 이수압을 계산하여 관리값을 설정하였다. 따라서 1링 굴진단위에 대한 배토량, 설계 막장압과 실제 가압한 이수압, 굴진 시 평균 추력과 커터토크의 관계를 크게 3구간으로 분류하여 비교분석하였고, 20 m간격의 데이터를 평균하여 경향을 파악하였다.

3.1 파쇄정도가 다양한 화강암 및 토사의 복합구간

파쇄정도가 다양한 화강암구간을 지나 충적층과 같이 토사와 암반이 복합된 구간의 기계데이터 검토로 막장이 수압, 배토량, 굴진 시 평균 추력과 커터토크를 Fig. 2에 나타내었다.

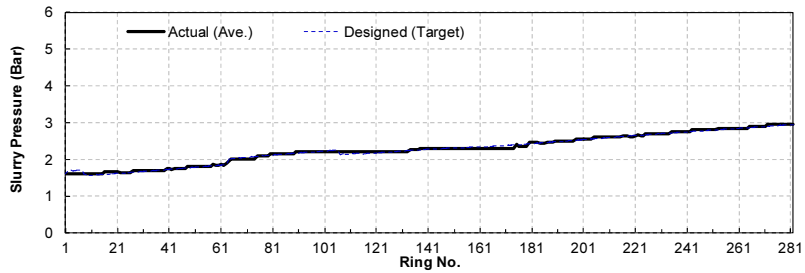
Fig. 2(a)에는 설계 막장압(Designed Target pressure, bar)과 실제 가압한 이수압(Actual pressure, bar)을 나타내었다. 전반적으로 설계 막장압에 대해 가압 이수압은 일치하게 제어할 수 있었다. 배토량의 경우 토사와의 복합 지반에서 경향이 바뀌었으나 설계 막장압을 제어하는데 있어서는 영향이 나타나지 않았다. 하부에 핵석층이 존재하는 구간에서도 이수압을 제어하는데 있어서 영향이 나타나지 않았다.

Fig. 2(b)에는 배토량에 대한 기계데이터를 나타내었다. 굴착면적과 굴진장에 대한 이론값 Q_0 에 10%의 오차범위(Limit, $Q_0 \times 1.1, m^3$)로 설정한 관리 상한값과 실제 계측된 배토량(Q, m^3)을 나타내었다. 이 구간(1~281링)의 배토량은 이론값에 대해 평균 95%의 범위로 일부 구간에서 관리값을 초과하는 구간은 초기굴진 시 다양한 점검을 위해 기계를 조정하는 과정과 유지관리를 위해 작업원이 막장에 진입해야 하기 때문에 챔버내 굴착도를 배출하면서 계측된 것으로 검토에서 제외하였다. 초기굴진 약 70링 이후에는 굴진면 상부에 충적층이 출현하고 이후 약 120링까지 배토량은 이론값의 약 80%로 감소되어 충적층과 조우한 것으로 판단된다. 즉, 굴진면에 토사 및 실트가 증가할수록 계측되는 배토량은 암반층 대비 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이후 하부에 핵석층이 존재하는 구간에서는 배토량의 차이에 의한 경향을 판단하기 어려웠다. 그 이유는 핵석의 크기가 작았거나, 커터에 의해 파쇄된 후 크러셔로 다시 파쇄되는 과정으로 굴착과 배토하는데 있어서 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다. 이후 파쇄정도가 다양한 화강암구간의 배토량은 비교적 일정한 수준으로 회복되어 비교적 안정적으로 나타나고 있다.

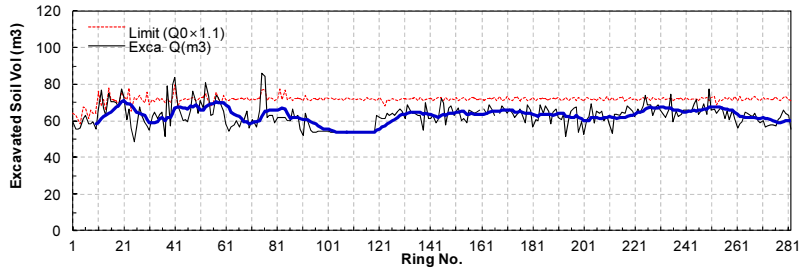
Fig. 2(c)에는 굴진 시 평균 추력(Thrust force, tonf)를 나타내었다. 추력은 장비성능(47,897 kN)에 대해 18~53%의 범위로 평균 약 35%로 제어되었다. 제4기 충적층과 홍적층이 혼재되어 있는 토사층이 굴진면에 차지하는 비율이 증가함에 따라 다소 감소하였다. 이후 파쇄정도가 다양한 화강암층이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이후 하부에 핵석층이 존재하는 구간에서는 불안정하게 변화하는 경향을 나타내고 있으나 파쇄정도가 다양한 화강암층보다 작은 값으로서 핵석의 크기가 크지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 2(d)에는 굴진 시 평균 커터토크(Cutter torque, kNm)를 나타내었다. 커터토크는 장비성능(4,065 kNm)에 대해 2.5~49.2%의 범위로 평균 약 18%로 제어되었다. 제4기 충적층과 홍적층과 같이 토사와 파쇄정도가 다양한 화강암이 혼재되어 있는 구간은 토사층이 굴진면에 차지하는 비율이 증가함에 따라 증가하였으나 커터교체

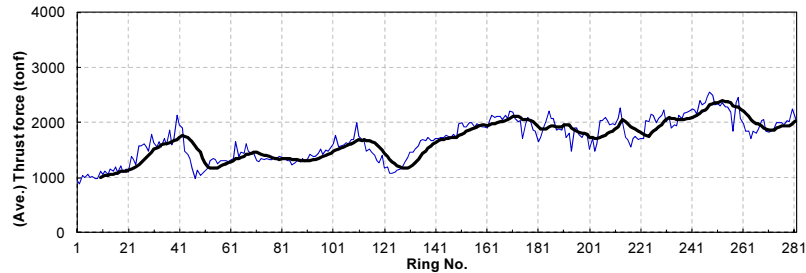
후 감소하였다. 이후 파쇄정도가 다양한 화강암층이 증가함에 따라 증가하는 변화를 나타내고 있다. 이후 하부에 핵석층이 예상된 구간에서는 불안정하게 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 굴진면에 암반이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 즉, 굴진면에 토사와 암반, 핵석층과 암반의 비율에 따라 커터토크도 영향을 받고 있는 것으로 판단된다.



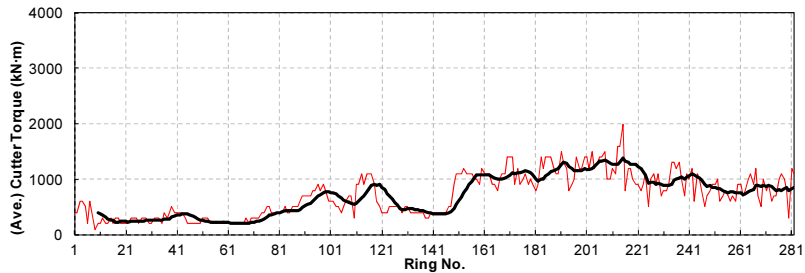
(a) Face slurry pressure



(b) Excavated soil volume



(c) Thrust force

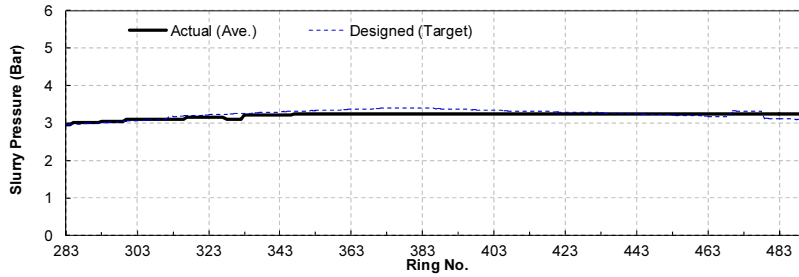


(d) Cutting wheel torque

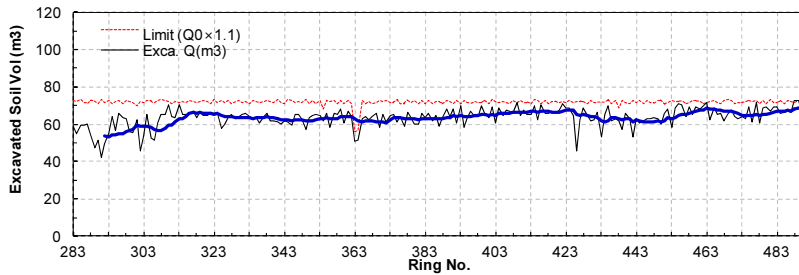
Fig. 2. TBM advance data for mixed soil

3.2 암반구간

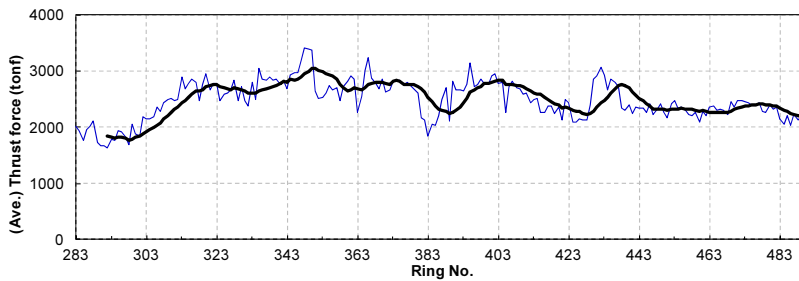
암반구간 기계데이터 검토로 막장이수압, 배토량, 굴진 시 평균 추력과 커터토크를 Fig. 3에 나타내었다.



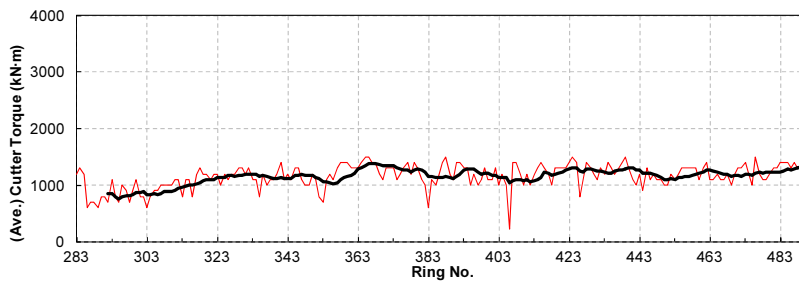
(a) Face slurry pressure



(b) Excavated soil volume



(c) Thrust force



(d) Cutting wheel torque

Fig. 3. TBM advance data for rock

www.kci.go.kr

Fig. 3(a)에 나타난 막장압은 전반적으로 설계 막장압에 대해 기압 이수압은 일치하고 있으며, 복합지반의 조우여부와 핵석층의 크기는 막장압 관리에는 영향을 미치지 않는 정도였던 것으로 파악된다.

Fig. 3(b)에 나타난 배토량은 이론값에 대해 평균 97%의 범위로 파쇄된 화강암 및 하부에 핵석층이 예상된 구간에서 암반구간으로 진입하는 과정에서 배토량이 낮게 나타나고 있다. 그러나 전단면 암반구간에서는 일정한 배토량이 나타나고 있으므로 복합지반의 조우여부에 파악하는데 있어서 배토량의 경향을 파악하는 것도 중요한 지표로 판단된다.

Fig. 3(c)에 나타난 추력은 장비성능에 대해 34~71%의 범위로 평균 약 51%로 제어되었다. 파쇄정도가 다양한 화강암층과 하부에 핵석층이 예상된 암반구간의 진입부에서는 암반구간보다 다소 낮게 나타나고 있다. 발진부터 암반구간 이전까지 평균 35%의 추력이 계측된 것에 비해 전단면 암반구간에서는 약 1.45배가 증가된 추력이 요구되고 있다.

Fig. 3(d)에 나타난 커터토크는 장비성능에 대해 5.4~37%의 범위로 평균 약 28%로 제어되었다. 파쇄정도가 다양한 화강암층과 하부에 핵석층이 존재하는 구간에서는 오차가 있지만 암반구간에 비해 비교적 낮은 값을 나타내고 있다. 전단면 암반구간에서는 비교적 일정한 범위를 유지하고 있는 이유로는 2~3일 간격으로 주기적으로 커터마모를 점검하고 교체에 따른 영향으로 판단된다.

3.3 상부 핵석층 및 하부 암반구간

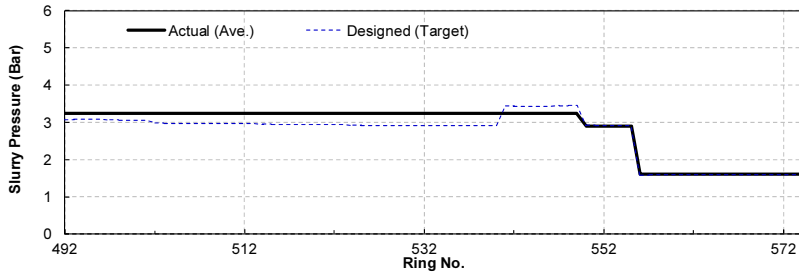
상부에 핵석층이 존재하고 하부 암반구간의 기계데이터 검토로 막장이수압, 배토량, 굴진 시 평균 추력과 커터토크를 Fig. 4에 나타내었다. 참고로 정거장 근처에서는 토피가 얇고, 선형관리가 필요하며, 기설치한 지중연속벽을 절단통과해야 하므로 별도의 굴진관리를 수행한 560 R 이후의 데이터는 검토대상에서 제외하였다.

Fig. 4(a)에 나타난 막장압은 설계 막장압에 대해 상부에 핵석층이 존재하는 구간에서는 천단부 붕괴를 방지하기 위해 여유값과 공기압의 손실을 고려하여 설계 막장압보다 약 0.3 bar를 증가시켰으나 제어하는데 있어서 이상징후는 나타나지 않아 천단부 상황을 모니터링하면서 도달을 위해 막장압을 단계적으로 감소시키는 운영을 시행하였다.

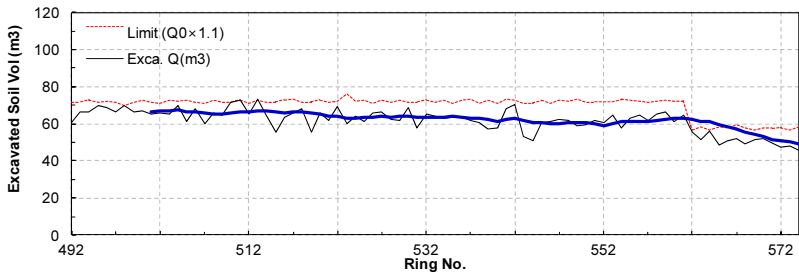
Fig. 4(b)에 나타난 배토량은 이론값에 대해 평균 97%이나, 불균질한 지반조건으로 인한 매 링마다 오차가 발생한 것으로 판단된다. 즉, 전단면에 핵석의 점유비율에 따라 변화하고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 4(c)에 나타난 추력은 장비성능에 대해 37~60%의 범위로 평균 약 49%로 제어되었다. 하부 암반층이 얇기 때문에 전단면 암반구간보다 낮게 나타난 것으로 파악된다.

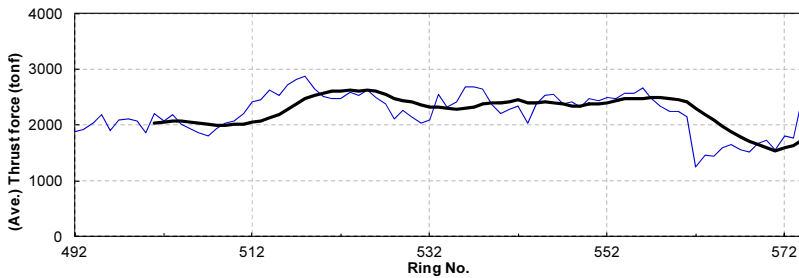
Fig. 4(d)에 나타난 커터토크는 장비성능에 대해 27~44%의 범위로 평균 약 37%로 제어되었다. 상부와 중간부에 파쇄정도가 다양한 화강암 및 핵석층이 존재하고 하부 암반층이 얇기 때문에 전단면 암반층보다 높은 경향을 나타내고 있는 것으로 판단된다.



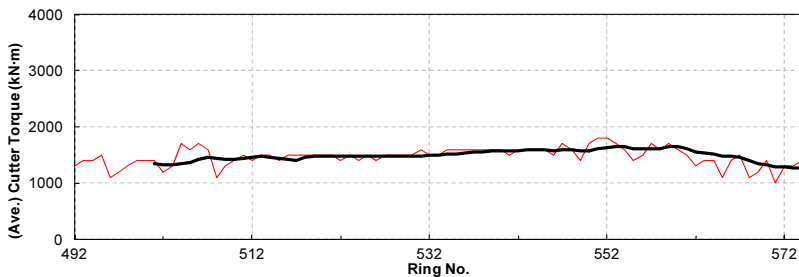
(a) Face slurry pressure



(b) Excavated soil volume



(c) Thrust force



(d) Cutting wheel torque

Fig. 4. TBM advance data for mixed soil and rock

3.4 구간별 기계데이터 분석결과의 정리

실드TBM의 초기굴진부터 파쇄정도가 다양한 화강암구간, 층적층이 혼재된 토사와 암반의 복합구간, 하부에 핵석층이 존재하는 구간, 전단면 암반구간, 상부와 중간부에는 파쇄정도가 다양한 화강암과 핵석층이 존재하고

하부에는 암반인 구간에 대해 가압한 이수압, 배토량, 추력, 커터토오크의 관계를 비교분석하였다.

막장 이수압의 경우, 설계 이수압에 대해 실제 가압하는 이수압에 있어서는 굴진면의 구성에 상관없이 제어가 능한 것으로 나타났다.

배토량의 경우, 전단면의 구성이 일정한 파쇄정도가 다양한 화강암구간과 암반구간의 경향은 비교적 일정한 경향으로 나타났다. 그러나 굴진면에 토사와 암반의 복합지반, 하부에 핵석층과 파쇄정도가 다양한 화강암과 같은 복합지반으로 구성된 경우는 배토량의 경향이 상이하게 나타나고 있다.

추력의 경우, 파쇄정도가 다양한 화강암구간에서 평균 35%, 전단면 암반구간에서 51%, 상부와 중간부에는 파쇄정도가 다양한 화강암이 존재하고 하부에는 암반인 구간에서는 49%로 굴진면에 암반층이 증가할수록 추력도 증가하는 경향으로 나타났다.

커터토오크의 경우, 2~3일 주기로 압기조건에서 커터점검을 시행하고 교환한 결과, 파쇄정도 다양한 화강암구간에서 평균 18%, 전단면 암반구간에서 평균 28%, 상부와 중간부에는 파쇄정도가 다양한 화강암이 존재하고 하부에는 암반인 구간에서 평균 37%로 나타났다. 즉 굴진면에 차지하는 암반의 비율에 따라 변화하며, 하부에 암반이 존재하는 경우가 가장 크게 나타났다.

상부와 중간부에 파쇄정도가 다양한 화강암 및 핵석층이 존재하고 하부 암반층이 얇기 때문에 전단면 암반층보다 높은 경향을 나타내고 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

도심지에서 쉴드TBM을 이용하여 복합지층을 굴진통과하는 경우의 기계데이터를 분석하였다. 가압 이수압, 배토량, 추력과 커터토오크의 관계를 비교분석한 결과는 다음과 같다.

1. 토사와 암반, 핵석층과 암반과 같이 암반특성이 다른 복합지층에서 막장 이수압을 공기압으로 가압하고 배기관 전방에 크리셔를 설치하는 경우, 굴진면의 구성에 상관없이 막장압 제어가 용이한 것으로 판단된다.
2. 배토량은 굴진면의 구성이 암반이 복합된 지반에서는 비교적 일정한 경향을 나타나지만, 토사와 암반 또는 핵석층이 포함된 구간에서는 경향이 변화되었다.
3. 추력은 굴진면에 강성이 강한 암반층의 비율이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었다.
4. 커터토오크는 굴진면의 하부에 출현하는 강성이 강한 암반의 비율이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었다.
5. 이상과 같은 결과로 볼 때, 막장 이수압을 계획과 같이 관리하는 경우에 배토량, 추력, 커터토오크의 경향을 파악함으로써 복합지층의 통과여부를 파악가능한 것으로 판단된다. 또한 장비의 부하를 방지하고 효율적인 운전관리를 위해서는 일정한 간격으로 커터를 점검하고 교체함으로써 지반조건에 적합한 제어와 운전이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업인 “TBM (Tunnel Boring Machine) 설계·제작 국산화 기술 개발(과제번호: 17SCIP-B129646-01)-2세부과제: TBM 운전·제어 시스템 및 커터 헤더의 최적화 설계 기술 개발”의 일환으로 작성되었습니다.

References

1. Kim, K.H., Kim, H., Mun, C.H., Kim, Y.H., Kim, D.H., Lee, J.Y. (2017), “A study on the establishment of domestic criteria through analysis of shield TBM requirements in overseas ITB (Invitation to Bid)”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 19, No. 6, pp. 985-997.
2. MTR Corporation Limited (2011a), Contract 1109 - Particular Specification, Tunnel Boring Machine (TBM) and Lining.
3. MTR Corporation Limited (2011b), Geotechnical Baseline Report (Revision C), Shatin to Central Link, Detailed Design for Sung Wong Toi to Ho Man Tin.