

경암반에서 TBM 굴진 해석 및 평가

배규진¹⁾ · 이용수²⁾ · 홍성완³⁾ · 박홍조⁴⁾

Analysis and Assessment of Tunnel Boring Machine Performance in Hard Rock

Gyu-Jin Bae, Yong-Soo Lee, Sung-Wan Hong and Hong-Jo Park

ABSTRACT

This research is designed to assess current achievement levels for mechanized excavation systems in Korea and suggest the model predictive of TBM performance using statistical approaches. A test section in the TBM construction sites is selected to measure and analyze TBM performance. The field records including operating data, time allocation into downtime categories, and machine design are analyzed on a shift basis. There are a total of 240 shifts, with most days operating two shifts per day. Examples of the probability density functions produced from the test section are presented and discussed. Relationships between TBM penetration rate and rock physical properties are investigated and the empirical equations for TBM performance prediction are also assessed with the field data.

1. 서 론

채래식 터널공법(ASSM)이나 NATM공법으로 암반 터널을 시공할 경우, 터널의 일 굴진장이 5.0 m를 넘는 경우가 드물기 때문에 양호한 암질에서 일 굴진장이 30 m 이상 될 수 있는 TBM(Tunnel Boring Machine) 공법은 오늘날 가히 혁신적인 터널공법이라 할 수 있다. TBM 공법은 이러한 공기단축 효과외에도 굴착시 진동 및 여굴의 감소효과와 터널 지보량의 경감효과 등, 다양한 잇점을 갖고 있기 때문에 미국 및 구라과 등지에서는 장대 암반 터널의 약 80% 이상을 TBM 공법으로 시공하고 있을 뿐만 아니라, 이 공법의 시공성 향상을 위한 많은 연구가 이루어지고 있다.

특히 최근 들어 TBM 굴착시 암반파쇄특성이나 TBM 굴진률에 영향을 미치는 주인자들이 자세히

규명됨에 따라 TBM 시공 터널의 공기예측에 가장 폭 넓게 이용되어 왔던 종래의 암석 일축압축강도가 공기예측의 주된 인자가 아니라는 사실이 밝혀지고 있어, TBM 기술선진국에서는 공기예측을 보다 정확히 수행할 수 있는 모델 개발에 주력하고 있다. 여기서 굴진률(Advance Rate)이란 TBM의 커터헤드가 1회전할 때 암반을 투과한 깊이를 나타내는 TBM의 순굴진속도(Penetration Rate)에, 하루중 실제 TBM이 굴착에 이용된 시간의 백분율을 나타내는 TBM의 가동률(Utilization)의 곱으로 표시된다.

이러한 TBM의 순굴진속도에 대한 최근까지의 연구동향을 살펴보면, Graham(1976)이 미국의 로빈스(Robbins)사의 축척된 경험을 토대로 암석의 일축압축강도로부터 순굴진속도를 산정할 수 있는 식을 제시하여 미국 및 캐나다 등지에서 TBM 공기예측에

* 1994년 8월 19일 접수

- 1) 정희원, 한국건설기술연구원, 지반연구실, 선임연구원
- 2) 정희원, 한국건설기술연구원, 지반연구실, 연구원
- 3) 정희원, 한국건설기술연구원, 지반연구실, 연구위원
- 4) 정희원, 유원건설(주), 토목사업부, 부장

이를 활용케 한 것과 유럽에서는 TBM 커터의 암석 분쇄가 암석의 일축압축강도보다는 인장강도와 더 밀접한 관계가 있다고 보아 Farmer와 Glossop(1980)이 이론해석을 통해 암석의 인장강도와 평균 커터 힘으로부터 순굴진속도를 산정하는 식을 제안한 것을 대표적으로 들 수 있다. 그 이후 Cassinelli(1982)등도 지질학분야의 암석분류 체계인 RSR방법에 의해 순굴진속도를 예측할 수 있는 방법을 제안하였으나, 이러한 방법들은 TBM 순굴진속도에 주된 영향을 미치는 커터헤드의 추력(Thrust)과 회전력(Torque) 및 암반의 파괴특성 등을 복합적으로 고려하고 있지 않아 실제 현장의 TBM 순굴진속도를 정확히 예견해 주지는 못하고 있다.

한편, Lislerud(1983)는 노르웨이의 축적된 TBM 터널기술을 토대로하여 순굴진속도의 영향인자로 알려진 커터헤드의 직경과 회전속도 그리고 DRI(Drilling Rate Index) 및 암반의 불연속성 등을 복합적으로 고려한 예측방법을 개발하였다. 그러나 이 방법은 TBM의 순굴진속도에 영향을 미치는 다양한 인자들을 고려하고는 있으나 각 인자별 수치적인 값을 정확히 결정하기가 용이하지 않으며 또한, 특수 장비가 요구되는 단점이 있다. Howarth(1987)는 이러한 Lislerud의 방법이 정확한 변수 값들을 적용하지 않으면 오히려 1~2개의 영향인자로서 구성되어 있는 기존의 간편식보다도 정도가 떨어진다는 점을 지적하고 현장에서 손쉽게 순굴진속도를 예측할 수 있는 방법의 중요성을 강조한 바 있다. 또한, Sanio(1985)는 실험실에서 손쉽게 구할 수 있는 점하중지수(Point Load Index)와 암석의 비등방성을 고려한 반경험식을, Hughes와 Boyd(1986)는 TBM을 가동시키는데 소요된 전력량으로부터 이러한 순굴진속도를 예측할 수 있는 식을 제안한 바 있고, Tarkoy(1986)는 굴착 암반의 평균 합경도(Average Total Hardness)와 작업효율과의 상관성이 매우 높다고 보고 순굴진속도를 예측할 수 있는 도표를 제시하였으며, Nelson(1983, 1992)은 파괴역학개념을 도입하여 암석의 파괴강도(Fracture Toughness)로부터 보다 정확하게 TBM의 순굴진속도를 예측할 수 있다고 제안하고 있으나 현재까지 연구단계에 머물고 있다.

이와같이 국외에서는 정확한 공기에측을 위해 자국의 현장조건에 부합하는 순굴진속도 예측모델의 개발에 연구투자를 아끼지 않고 있으나 국내에서는

관련 연구없이 여전히 암석의 일축압축강도로부터 개괄적으로 순굴진속도를 추정, 적용하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국내 현장에 부합하는 TBM의 굴진률 예측모델을 개발하기 위하여 1차적으로 국내 TBM 시공현장에 시험구간을 설정하고 이 구간에서의 TBM 굴진 실적결과를 토대로 기존 예측방법들의 적합성 검증은 수행함과 아울러 TBM 순굴진속도의 예측방법으로서 통계학적 방법의 사용 가능성을 모색하였다.

2. 시험구간의 현장조건

2.1 터널시공 및 지질조건

시험구간으로 선정된 터널 현장은 해발 120~290 m 내외의 험준한 서울근교 산악지로, 기존 도로터널로부터 약 200~400 m 정도 남쪽에 위치하고 있는 대단면 도로터널이다. 시공중인 본 터널은 길이가 약 1,660 m이고 굴착폭이 13.5 m인 쌍터널로 되어 있으며, 굴착방법은 1차로 TBM을 이용하여 먼저 파이롯 터널을 시공한 후, 2차로 확공발파하여 완공하는, 이른바 TBM-NATM 병용방법이 적용되고 있다(Fig. 1).

현장의 지질조건을 살펴보면, 경기능곡에 해당하는 중생대 주라기의 대보 화강암을 기반암으로 상부지층은 기반암의 풍화대와 표토, 매립토층으로 구성되어 있는 지질구조를 보이고 있다. 본 지역의 화강암은 서울 화강암이라고 불리우는데 이 지역은 선편암류와 경기 편마암의 복합편암 및 편마암류와 시대미상의 반상화강암이 관입되어 있다.

본 터널구간의 지층은 0.5~1.2 m의 두께로 분포되어 있는 피복층과 그 하부에 풍화암, 연암, 경암으로 구성된 기반암층이 놓여 있다. 피복층인 붕적층은 실트질이 섞인 세립질과 조립질의 모래로 구성되어 있으며, 지표 상부로부터 0.5~0.7 m 내외의 두께로 분포되어 있다. 기반암층을 이루는 화강암은 흑운모 계로써 일축압축강도가 650~1,350 kg/cm² 정도이며, 풍화가 된 지역은 표준관입시험시의 N치가 50회/4~5 cm 내외로 매우 조밀한 상태로 상부로부터 5.0 m 이내에 분포되어 있다. 연암층은 균열이 발달되어 있고 경암이 서로 교차하고 입자는 조립질로써 풍화암층의 하부에 분포되어 있다. 경암층은 균열이 발달되어 있으나 풍화작용을 거의 받지 않은 신선한 상태로 지표면으로부터 5.0~10.0 m 심도 아래부터

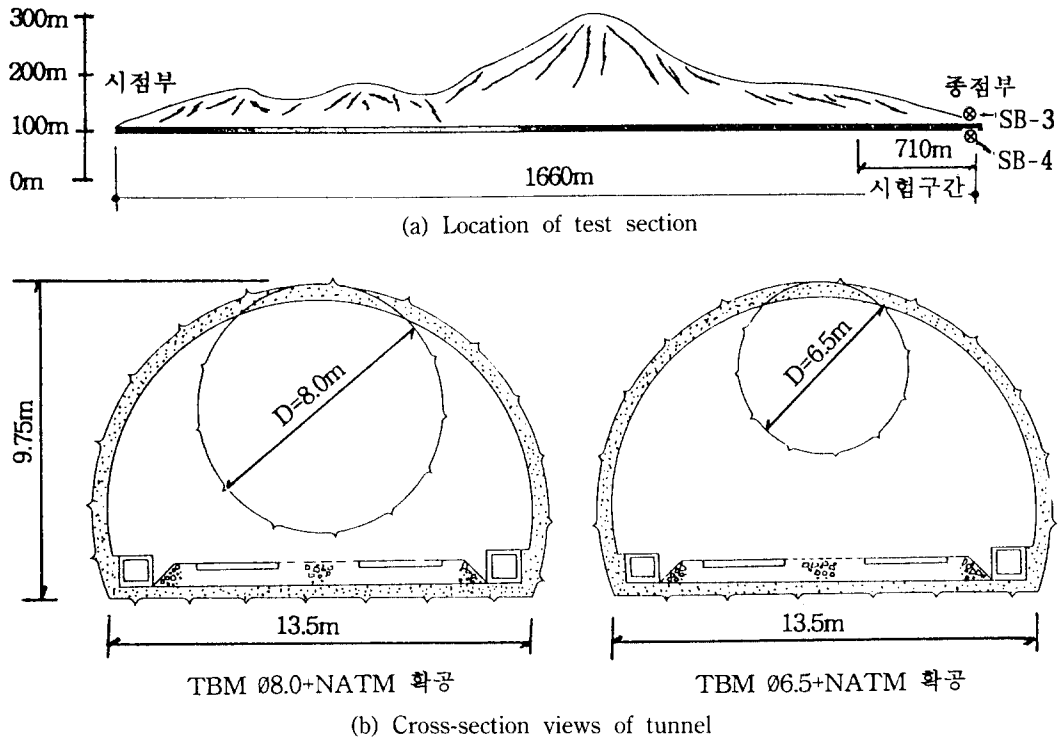


Fig. 1. Location and cross-sectional views of the test tunnel

나타나고 있다.

Table 1은 시점부 시추조사결과(SB-3, SB-4)와 시험구간의 터널내 암석물성 시험결과를 나타내고 있다. 터널내 암석시험을 위한 코어채취는 종점부에 100 m 떨어진 지점에서 터널 측벽부 5 m 간격으로 5개소에 대해 이루어졌으며, 시험구간의 지반은 석영분을 많이 포함하고 있는 화강암으로 구성되어 있어 마모경도가 매우 크게 나타나고 있고 강도에서도 비교적 큰 값을 보이고 있다. 시험구간은 Fig. 1에서 보이는 바와같이 종점부에서 710 m 구간이며, TBM 굴진속도측정은 굴착직경이 8.0 m인 TBM 구간을 대상으로 이루어 졌다.

2.2 투입 TBM의 특성

일반적으로 TBM 굴착장비는 기계설비부분과 후속설비부분로 크게 두 부분으로 구분할 수 있으며 기계설비부분은 커터 및 커터헤드 그리고 추진 및 클램핑 시스템으로 다시 구분할 수 있다. 기계설비 부분인 커터는 동일한 중심의 원형 궤적을 따라 회

Table 1. Rock test data.

측정위치	시험구간	SB-3	SB-4
심도(m)	터널내부	21.5~23.5	23.0~25.0
단위중량 (g/cm ³)	2.61	2.61	2.62
일축압축강도 (kg/cm ²)	880~1,320	1,080	690
인장강도 (kg/cm ²)	75~152	30	45
반발강도 (Rebound Hardness)	39~48	-	-
마모경도 (Abrasion Hardness)	4.7~7.2	-	-
합경도 (Total Hardness)	84~128	-	-
탄성계수 (×10 ⁵ kg/cm ²)	-	2.10	1.64
포아송비	-	0.22	0.21

전함과 동시에 암반 굴착면에 수직력을 전달하는 역할을 하는데, 이때 수직력에 의하여 발생하는 응력의

크기가 암반의 강도보다 크면 암반이 파쇄된다. 커터헤드는 TBM의 선단부에 위치하고 있으며 커터헤드에 배열 장착된 커터를 압착, 회전시켜 암반을 파쇄시킨다. 또한 굴착작업에 의하여 소모된 커터의 교환이 가능하고 굴착된 암석을 스크래퍼에 집적시켜서 컨베이어 벨트나 광차를 통해 터널 외부로 방출시킨다. 커터헤드의 회전을 위한 회전축과 굴착 및 전진작용을 하는 추진 및 클램핑 시스템이 있는데, 추진시스템은 암반의 특성, 커터헤드의 회전수 및 회전력에 따라 다르고 추진실린더에 의해 커터헤드를 밀어서 굴진하며 클램핑 시스템은 TBM 본체를 암반측면에 지지함으로써 굴진을 가능하게 하는 기능을 갖고 있다.

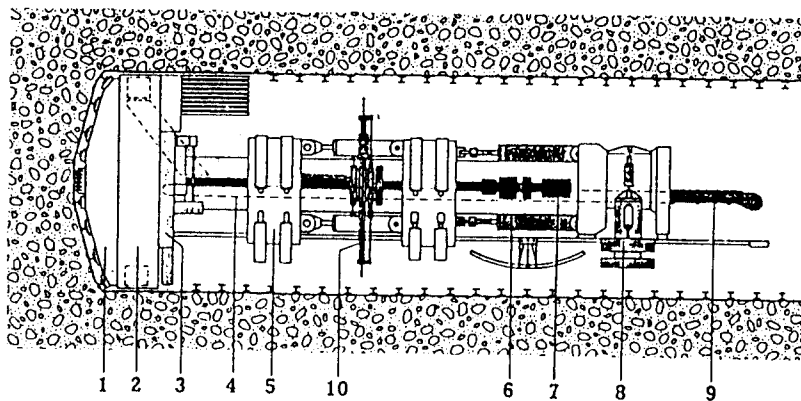
TBM의 회전 및 추진시스템은 제작회사마다 그 특징을 갖고 있으며, 가장 대표적인 시스템은 굴진성을 좋게 하기 위해 커터헤드를 회전시키는 회전축이 커터헤드의 전면부에 오게 하는 TBM과 하중분산 효과가 크도록 회전축이 후면부에 위치하여 커터헤드를 회전시키는 TBM 등, 두가지를 들 수 있다. 본

시험구간에 투입된 TBM 장비는 독일의 Wirth사 제품이며 회전축이 후면부에 위치하여 커터헤드를 회전시키는 시스템으로 구성되어 있다.

Table 2는 시험구간에 투입된 TBM의 제원을 나타내고 있으며, Fig. 2는 투입된 TBM의 기계구성을 보여주고 있다. 본 현장의 TBM 후속설비는 굴진시 발생하는 버력을 외부로 방출하기 위한 컨베이어 벨트 시스템이 이용되었다.

2.3 TBM 굴진속도 측정

본 연구에서는 국내 경암반에서의 대구경 TBM의 굴진특성을 조사, 분석하기 위하여 국내 TBM 시공 현장에 대한 시험구간을 설정하고 TBM의 굴진속도를 측정하였다. TBM의 굴진속도 측정항목으로는 TBM 순가동시간, 가동시의 TBM 커터의 관입깊이, TBM 굴진시 적용된 추력, 회전력 및 토크, TBM의 휴지시간 및 휴지 발생원인, 커터 추력크기별 TBM의 순굴진속도 등이며, 측정은 TBM 공정관리가 1일 2교대로 이루어지므로 매 shift마다 전술한 측정항목



1. Cutter head 2. Hydraulically adjustable jacket with jacket extension
3. Lining installation and transporting system 4. Inner kelly 5. Outer kelly 6. Advance cylinders
7. Cutter head drive 8. Rear support 9. Belt conveyer 10. Anchor drilling ring

Fig. 2. Layout of TBM

Table 2. Layout of TBM equipment.

장비형태	굴착 직경	커터헤드 회전수	Stroke	Resetting Time	총중량	설비 용량	본체 길이	커터수량			
								Center Cutter	Outer Cutter	Gauge Cutter	Total Cutter
TVB 800H	8.0 m	7.0 rpm	1.6 m	10 min	520 ton	2400 kw	20 m	6	57	3	66

들을 위주로 수행되었다. 또한 시험구간내 TBM의 굴진속도 측정기간은 4개월이었으므로 현장 측정자료는 총 240 shift에 대한 자료들로 구성되었다.

3. TBM의 굴진속도 측정결과 및 자료분석

3.1 측정결과

본 시험구간에서는 TBM의 굴진속도 분석을 위해 TBM의 shift당 가동률, 순굴진속도 및 굴진률이 측정되었으며, 또한 굴진률을 떨어뜨리는 요소들을 파악하기 위해 가동지체 시간의 조사 및 분석이 이루어졌다. 4개월, 240 shift 동안 수행된 본 현장의 TBM 굴진속도 측정결과, Table 3에서와 같이 평균 순굴진속도는 1.03 m/hr, 평균가동률은 23.83%였고 평균 굴진률은 0.25 m/hr였으며, 시험구간에서의 shift별 가동률, 순굴진속도 및 굴진률의 크기는 Fig. 3과 같이 다양한 분포를 보였다.

3.2 TBM의 가동률 및 가동 지체시간(Down Time) 분석

TBM의 굴진률 예측을 위해서는 TBM의 가동지체 시간에 대한 분석으로부터 가동률의 추정이 우선적으로 필요하다. 가동지체시간에 대한 연구는 각국의 TBM 제조회사들을 중심으로 수행되어 왔으나 보다 체계적인 연구는 Nelson(1984)이 미국내 6개소 TBM 건설현장에 대한 지체 시간을 분석, 연구한 것을 들 수 있다. Nelson은 TBM 가동지체를 가장 빈번하게 발생시키는 요인으로 부실한 Back-up system과 TBM 유지관리 및 보수업을 제시하고 일반적으로 가장 긴 지체시간을 갖는 요인은 TBM 기계보수에 있다고 밝히고 있다. 그리고 Tarkoy(1986)는 굴착 암반의 평균 합경도와 가동률과의 상관관계가 있음을 밝히고, 가동률은 10% 이하에서 74%에 이르기까지 폭 넓게 변하며, 평균치는 약 35%임을 제시하였다. 그러나 가동률은 TBM 직경, Back-up system의 특성 등, 여러가지 요인에 의해 변화할 수 있기 때문에 평균 합경도로부터 일반적인 경향은 추정할 수 있으나 실질적인 적용은 어렵다. 또한 CIRIA(1988)는 65개소의 TBM현장의 가동 지체시간 측정자료를 분석하여 평균 가동률이 약 40% 정도이고(최소 21.7%, 최대 71% 정도) 50% 이상의 가동률을 보인 경우는 대부분 석회암과 편암 지역임을 밝힌 바 있다.

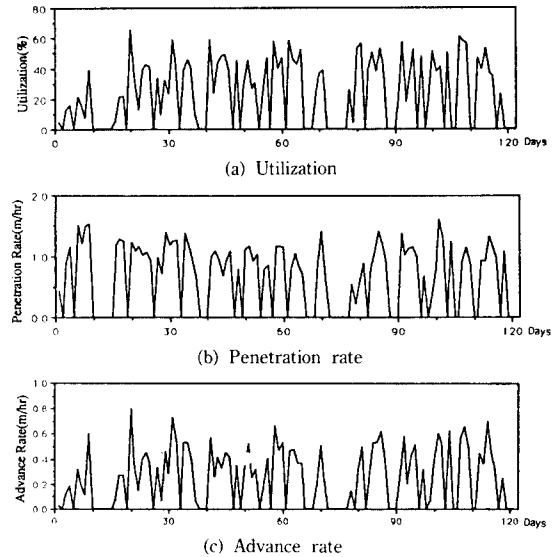


Fig. 3. Utilization, penetration rate and advance rate of TBM in test section

한편, 국내의 경우는 5개소 TBM 시공현장의 굴진속도 측정자료를 분석한 한국건설기술연구원 연구보고서(1993)에 따르면, TBM의 가동률이 15~30.4% (평균 21.3%)로 나타나 있다. 본 시험구간에서 측정된 TBM의 평균 가동률은 Table 3에서와 같이 23.83%로서, 기시공된 국내 TBM 터널의 평균치 21.3%에 비해 다소 높은 값을 보이고 있는데, 이는 시험구간의 지반조건이 매우 양호하여 지보재 설치에 따른 가동지체시간이 타현장에 비해 다소 줄어들었기 때문으로 사료된다. 그러나 이러한 가동률 값은 TBM 기술 선진국에서의 평균치 35~40%에 비해서는 매우 낮은 값이며, 특히 CIRIA에서 조사한 최소 가동률(21.7%)에 근접하고 있어 향후 국내 TBM의 굴진률 증대방안이 강구되어야 할 것으로 판단된다.

Fig. 4는 시험구간에서 TBM의 가동률을 떨어뜨리는 주 요인들을 조사하고 이들의 시간지체율을 파악하기 위하여 가동지체 요인별 지체시간을 시험구간 관통시 총 소요된 공사시간으로 나눈 백분율로 도시한 것이다. 일반적으로 TBM 시공현장에서 발생하는 TBM 가동지체 요인은 매우 다양하나 주된 것은 TBM의 유지관리 및 보수업무, 버럭처리 관련업무(컨베이어 벨트 연결 및 점검, 수리), 지보재 설치 등의 지반처리업무, 환기 및 배전 등과 같은 부대시설의 관리업무 등을 들 수 있으므로 나머지 휴식시간, 공가

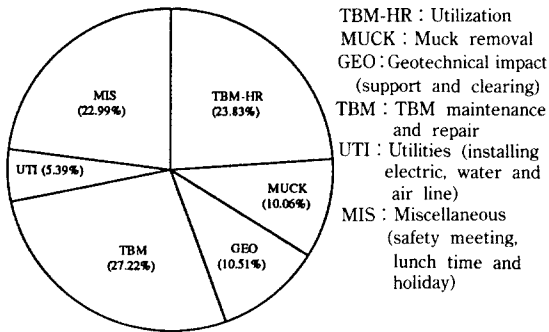


Fig. 4. Downtime record for the test section

등의 잔여 지체시간을 기타로 처리하면 Fig.4에서와 같이 크게 6가지의 TBM지체시간 분석항으로 분류할 수 있다. 그림상으로부터 시공기간 중 가장 많은 시간지체를 발생시킨 요소는 TBM의 유지관리 및 보수업무임을 알 수 있는데, 이는 본 시험구간과 같이 지반이 양호한 경암반일수록 커터교체, 모터 및 전기 시스템의 보수 등에 소요되는 시간이 다른 요인별 지체시간에 비해 증가하기 때문으로 사료된다.

특히, Fig.4에서와 같이 지보재 설치 등의 지반처리업무에 소요된 시간 지체는 10.5%로서, Nelson (1984)의 조사 결과인 약 14%에 비해 다소 낮게 나타나고 있으며, TBM 유지관리 및 보수업무에 소요된 시간지체는 27.2%로서 Nelson의 약 20%에 비해 높게 나타나고 있다. 이것은 시험구간의 지반이 RMR 75 이상, 암석의 함경도 80 이상인 강한 화강암으로 구성되어 있어 터널 굴진시 지보재 설치량이 매우 작았던 반면, TBM의 커터 마모도가 매우 높아 커터 교체시간이 상당히 소요되었기 때문으로 판단된다. 또한 그림상의 기타항이 가동지체 요인중에 세번째로 큰 지체시간을 갖는 것으로 나타나 있는데, 이는 잦은 휴무 및 TBM 정지, 안전교육 그리고 TBM의 시험 가동 등에 따른 것으로 보인다.

3.3 TBM의 순굴진속도 및 굴진률 분석

TBM의 순굴진속도는 TBM 헤드가 일정시간 회

전할 때 암반을 뚫고 들어간 관입 깊이를 나타내는 지수이므로 TBM 터널 시공시의 공기 예측에 가장 기본적인 요소로 볼 수 있다. 이러한 순굴진속도에 대한 현장사례 연구로는 Nelson(1983)이 석회암과 같이 강도나 경도가 다소 낮은 연암지층에서 특정 크기(직경 5.0~5.5 m)의 TBM에 관한 굴진측정으로 부터 평균 순굴진속도를 약 2.5 m/hr, 최소 순굴진속도를 2.0 m/hr라고 제시한 것과 그뒤 영국의 CIRIA (1988)가 세계 각국의 65개소의 TBM 굴진자료들을 수집, 분석하여 경암반에서의 최대 순굴진속도 값이 직경 3.5 m TBM 굴진시의 7.62 m/hr이며, TBM 크기를 고려치 않은 전체 현장의 평균 순굴진속도는 1.83 m/hr, 직경 8.0 m 이상의 대구경 TBM 시공시의 순굴진속도는 1.2~2.3 m/hr(평균 1.6 m/hr)이라고 밝힌 것을 대표적으로 들 수가 있다. 또한 한국건설기술연구원(1993)의 연구결과에 따르면 국내 TBM 현장의 평균 순굴진속도는 약 1.9 m/hr이나 직경 4.5 m 이하의 TBM이 투입된 현장의 평균 순굴진속도는 2.2 m/hr로 평균치보다 다소 높고, 직경 6.5 m 이상의 TBM이 투입된 현장에서는 0.95 m/hr로 상당히 낮게 나타나고 있다고 밝힌 바 있다.

본 시험구간에서의 TBM 평균 순굴진속도의 크기는 Table 3에서 보는 바와 같이 1.03 m/hr로써, 최근까지의 국외 연구결과에 비해 매우 낮은 값으로 나타남을 알 수 있다. 일반적으로 TBM은 제품종류에 따라 그 기계적인 특성이 다양하며 특히 TBM 가동자의 가동방법, 가동속력도 등이 현장마다 변할 수 있으므로 TBM의 기계적인 요소와 TBM의 순굴진속도와 상관성을 분석하기가 용이하지는 않으나, 직경 3~5 m 이내의 소구경 TBM 시공시 보다 큰 순굴진속도를 얻을 수 있다는 일반화된 사실과 전술한 국내의 현장사례 연구결과들을 종합적으로 고려하면 TBM 직경의 증가에 따른 순굴진속도의 비례적인 감소를 예상할 수가 있다. 결과적으로 본 시험구간은 직경 8.0 m의 대구경 TBM을 사용함에 따라 매우 낮은 순굴진속도를 나타낸 것으로 보이며, 특히 현

Table 3. Summary of TBM performance records.

터널종류	굴착직경	지반조건	분석 Shift 수	순굴진속도	가동률	굴진률
도로터널	8.0 m	화강암	240개	1.03 m/hr	23.83%	0.25 m/hr

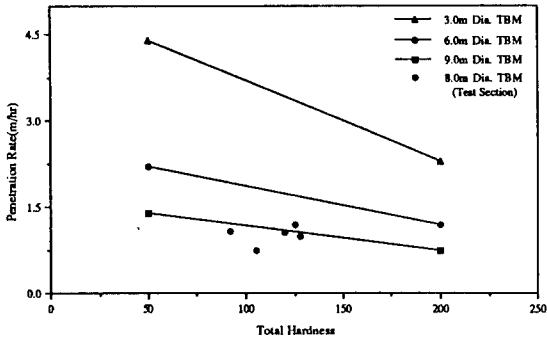


Fig. 5. Relationship between total hardness and TBM penetration rate

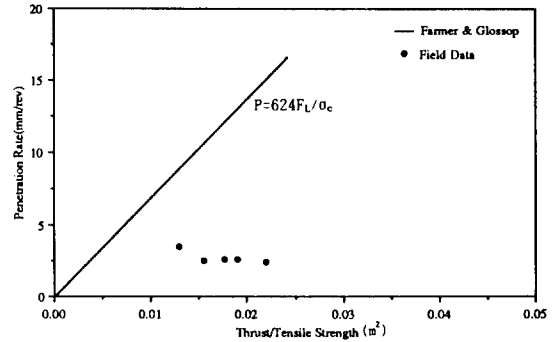


Fig. 7. Relationship between rock strength ratio (trust/tensile strength) and TBM penetration rate

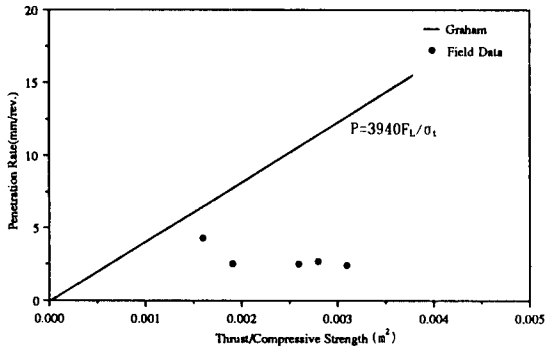


Fig. 6. Relationship between rock strength ratio (trust/compressive strength) and TBM penetration rate

장지반이 TBM 굴진률을 떨어뜨리는 정도가 큰 화강암으로 이루어져 있어(Table 1 참조) 국외 조사치에 비해 상당히 낮은 값으로 나타나고 있다고 판단된다.

Fig. 5는 이와 같은 암석의 경도와 TBM 직경크기가 순굴진속도와는 어느 정도의 상관성이 있는지를 조사하기 위하여 Tarkoy(1987)가 제안한 TBM 순굴진속도 산정 도표와 본 시험구간의 측정자료들을 비교, 도시한 것이다. Tarkoy는 TBM의 순굴진속도가 기계적인 요소인 TBM 직경과 암의 강도 뿐만 아니라 경도에 따라서도 크게 영향을 받는다고 밝히고 암석의 강도와 경도를 복합적으로 고려하는 합경도(Total Hardness), HT 개념을 다음과 같은 식(1)로 표시하였다.

$$H_T = H_R \cdot (H_A)^{1/2} \quad (1)$$

여기서, H_R 는 슈미트 햄머로부터 구할 수 있는 반발경도(Rebound Hardness)이며, H_A 는 수정테버마

모시험기로부터 구할 수 있는 마모경도(Abrasion Hardness)이다. 이 수정테버마모시험기는 Tarkoy가 기존의 테버마모시험기(가속 또는 형접의 마모 시험기)를 암석에 이용할 수 있도록 수정, 고안한 시험기이다. Fig. 5로부터 8 m의 대구경 TBM이 사용된 본 시험구간의 측정치들이 9 m 직경의 TBM을 기준으로 한 Tarkoy의 제안선 하부에 도시되고 있으며, 합경도 증가에 따른 순굴진속도의 감소도 뚜렷한 형태를 보이고 있지 않음을 알 수 있다. 이는 TBM의 순굴진속도에 영향을 미치는 입자들이 TBM 직경이나 암석의 합경도 이외에도 TBM 추력이나 회전력, 커터의 마모도, 암반의 질리특성이나 지하수 상태 등, 다양한 인자들이 있으나 Tarkoy의 해석도표가 이들을 복합적으로 반영하고 있지 않기 때문으로 사료된다.

Fig. 6은 Graham(1976)이 암석의 일축압축강도와 TBM 추력을 주인자로 하여 제안한 TBM 순굴진속도 산정식과 시험구간의 측정치들을 비교 도시한 것이며, Fig. 7은 Farmer & Glossop(1980)이 암석의 인장강도와 TBM 추력을 주인자로 하여 제안한 TBM 순굴진속도 산정식과 시험구간의 측정치들을 비교 도시한 것이다. 본 현장시험에서는 추력을 인위적으로 13 ton에서 21 ton까지 5단계로 변화시키고 그때 각각의 순굴진속도를 측정, 추력이 순굴진속도에 미치는 영향을 조사하였다. 두 그림으로부터 시험구간의 측정치들이 제안선들과는 큰 차이를 보이면서 모두 그 하부에 도시되고 있으며, 압축강도나 인장강도에 대한 추력의 비가 증가하여도 순굴진속도가 비례적으로 증가하는 형태 또한 보이지 않음을 알 수 있다. 결과적으로 특정한 기계적인 영향인자와 암반의 물성 계수로부터 TBM의 순굴진속도를 예측하기란 용이

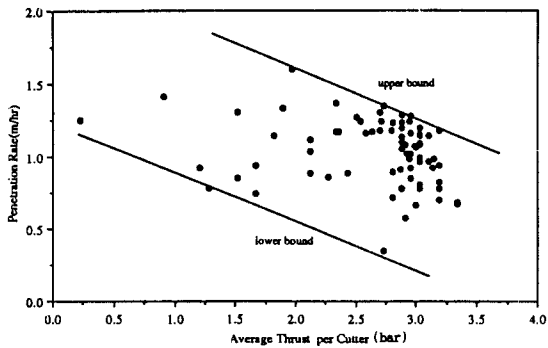


Fig. 8. Plot of penetration rate versus average thrust per cutter

하지 않으며, 보다 정확한 순굴진속도 예측을 위해서는 TBM 순굴진속도에 영향을 미치는 제 인자들을 복합적으로 고려한 분석연구가 필요하다.

Fig. 8은 TBM 커터의 추력에 따라 순굴진속도의 크기가 어떻게 변화하는지를 파악하기 위하여 shift당 평균 순굴진속도와 평균커터 추력의 상관성을 도시한 것이다. 그림으로부터 현장자료의 산포도는 상당히 큰 편이나 추력 증가에 따라 순굴진속도가 떨어지는 양상을 볼 수 있다. 추력은 TBM 헤드를 미는 힘으로 정의되며, 일반적으로 추력이 증가하면 순굴진속도가 증가하는 경향을 보인다. 그러나 이는 동일조건인 암반에서 TBM을 굴진할 때 나타나는 것이며, 본 시험구간에서와 같이 지반이 강해 초기 굴진시의 추력하에서는 소정의 순굴진속도를 얻기 어려워 추력을 증가시켰을 경우에는 증가된 추력의 역할이 단지 감소되는 순굴진속도를 어느 정도 회복시키는 정도에 머물게 되므로 이와 같은 현상이 발생한 것으로 판단된다.

한편, TBM의 굴진성능을 평가하는 지표인 TBM의 굴진률은 TBM의 가동률에 순굴진속도를 곱한 것으로 표기할 수 있는데, 본 시험구간에서는 Table 3에서와 같이 평균치가 0.25 m/hr로, CIRIA의 연구결과(경암반에서 직경 7.0 m 이상의 TBM이 투입된 현장의 경우)인 0.5~0.95 m/hr(평균 0.7 m/hr)에 비해 3배 정도의 매우 낮은 굴진률을 보이고 있다. 굴진률의 이와같은 큰 감소는 전술한 순굴진속도와 가동률의 저하 원인들이 서로 중첩됨에 따라 발생한 것으로 판단된다.

4. 통계학적 방법에 의한 TBM의 굴진속도

분석

터널 현장지반은 지질학적 특성에 따라 매 막장마다 그 성질이 다양하게 변화할 수 있기 때문에 특정한 소수의 지반물성 실험자료로부터 TBM의 순굴진속도를 예측하는 기존의 순굴진속도 예측모델들은 현장적용에 상당한 제약을 받게 된다. 또한 공기에 측을 위해서는 TBM의 굴진속도를 산정하는 TBM의 순굴진속도 외에 가동률에 대한 정보도 함께 알아야 하는데, 가동률의 경우 현재까지 암중에 따라 개괄적인 값(20~50%)을 적용하고 있는 실정이므로 특정한 터널 프로젝트내에서 TBM의 굴진속도를 예측하기가 용이하지 않다.

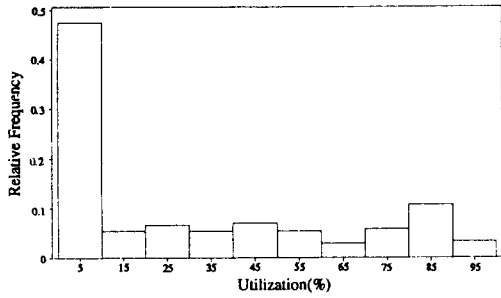
따라서 본 연구에서는 지반조건이 비교적 유사한 시험구간에 대한 TBM의 가동률과 순굴진속도를 통계적인 방법으로 분석, 각 시공 shift마다 가동률과 순굴진속도의 값이 어떻게 변화하는지를 조사, 분석하였다.

4.1 Shift당 가동률 및 순굴진속도의 분석

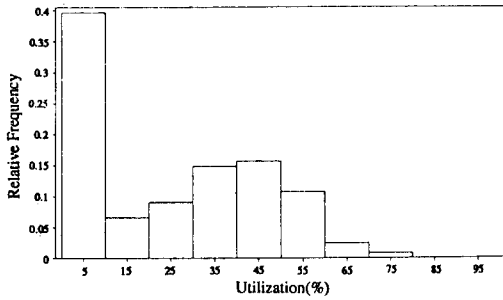
본 연구에서는 시험기간중(4개월 기준) 매 shift마다 TBM의 가동률(Utilization)이 어떻게 변화하는지를 파악하기 위하여 shift당 TBM 가동률과 그 가동률의 상대발생 빈도와 상관관계를 검토하였다. 여기서 shift당 TBM 가동률은 1 shift, 즉 12시간중 TBM이 굴진을 위해 가동된 시간이 얼마인지를 나타내는 지수(%)로서 정의하였다.

Fig. 9(a)는 시험기간 동안 각 shift 별로 발생한 가동률의 상대발생 빈도를 도시한 그림이다. 그림에서와 같이 발생빈도별 가동률 크기분포가 일관성 있는 형태로 나타나지 않고 있으며, 가동률이 5% 미만인 경우의 발생빈도가 매우 높게 나타나고 있다. 시험구간이 설정된 본 터널현장은 TBM의 굴진 공정관리를 shift 개념이 아닌 일굴진개념으로 계획, 시공하고 있으므로 1 shift를 12시간이 아닌 24시간으로 보아 이를 재도시하면 Fig. 9(b)와 같은 그림을 얻을 수 있다. 하지만 이 그림도 낮은 가동률에서 매우 높은 발생 빈도를 보이고 있어 통계적인 분석이 용이하지 않음을 알 수 있다.

그러나 여기서 매우 낮은 가동률의 경우(2.5% 이하)를 분석해 보면 이들 대부분이 TBM 굴진과 직접 연관이 없는 가동지체시간(공휴일, 시공사 자체문제



(a) Shift base



(b) Day base

Fig. 9. Relative frequency distribution for utilization (all shift data)

인한 공사중지시간 등)이 발생한 경우나 가동시험시 공기간 등으로 비정상 가동상태(총 35.5%)로 구성되어 있으므로, 이를 제외한 정상가동상태(총 64.5%)의 자료들만을 이용하게 되면 Fig. 10과 같은 상관도를 얻을 수 있다. Fig. 10에서와 같이 정상가동상태에 대한 자료들을 도정한 경우, 발생 빈도별 가동률 크기분포가 정규분포곡선형태를 따르고 있어, TBM의 정상적인 굴진이 이루어지는 상태에서의 shift 당 TBM의 가동률은 정규분포곡선을 이용하여 해석이 가능할 것으로 판단된다.

또한 시험구간내 TBM 순굴진속도의 크기분포가 어떻게 변화하는지를 조사하기 위하여 가동률 분석시와 같은 방법(Fig. 9, 10 참조)으로 순굴진속도를 도출해 본 결과, 순굴진속도의 경우도 정상가동상태에 대한 자료들을 선별하여 이용할 때는 Fig. 11과 같이 정규분포곡선 형태로 나타나고 있음을 알 수 있다. 여기서 순굴진속도는 편의상 TBM 헤더가 1회전할 때 관입된 길이로 나타내지 않고 TBM 굴진거리를 순굴진시간으로 나눈 값(단위, m/hr)으로 정의한다.

결과적으로 TBM이 정상가동될 때에는 TBM의 발생빈도별 가동률과 순굴진속도가 정규분포곡선으로

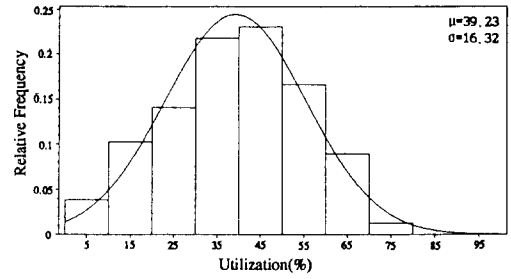


Fig. 10. Relative frequency distribution for utilization (screened data)

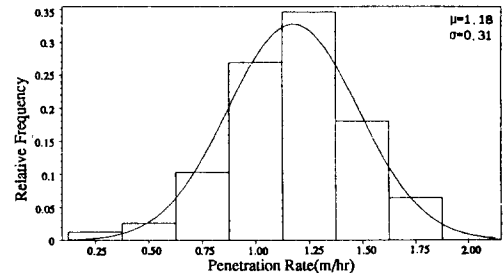
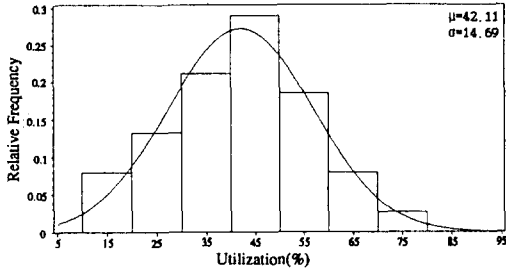


Fig. 11. Relative frequency distribution for penetration rate (screened data)

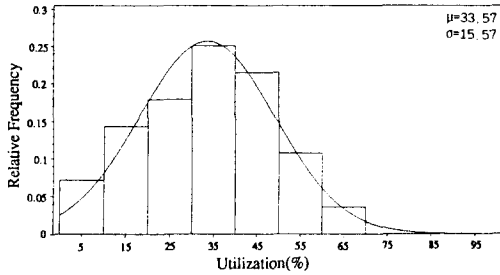
해석이 가능하다고 볼 수 있다. 그러나 이를 위해서는 정규분포곡선의 형태를 규정하는 제인자들, 즉 최대 발생빈도, 평균 순굴진속도 및 가동률, 그리고 이들의 표준편차의 크기 등에 대한 규명이 현장조건에 따라 선행되어야 하므로 향후 TBM의 굴진 자료의 축적과 이의 분석연구가 수반되어야 할 것으로 사료된다.

4.2 지보형태에 따른 Shift당 가동률 및 순굴진속도 분석

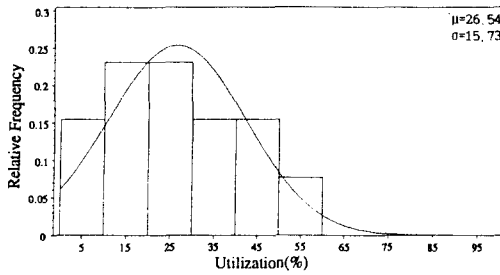
TBM의 굴진속도는 현장지반의 특성에 따라 크게 변화하는 것으로 알려져 있으나 특정 시공구간의 지반조건을 하나의 대표적인 특성인자로서 대별하기가 용이치 않기 때문에 본 연구에서는 한정된 시추조사 자료를 기반으로 하지만 터널현장의 관측을 통해 수정, 보완을 하게 되는 지보형태를 지반조건대신에 활용, 사용구간별로 발생하는 순굴진속도와 가동률의 변화추이와 지보형태와의 상관성을 분석하였다. 본 시험구간에 적용된 지보형태는 T-1, T-2, T-3 등, 세 종류이며 여기서 T-1의 경우는 비지보구간, T-2의 경우는 록볼트 설치 및 국부적인 슛크리트 시공구간, T-3의 경우는 강제 지보를 포함한 완전 지보구간을



(a) Non support (T-1)



(b) Partial ground support (T-2)

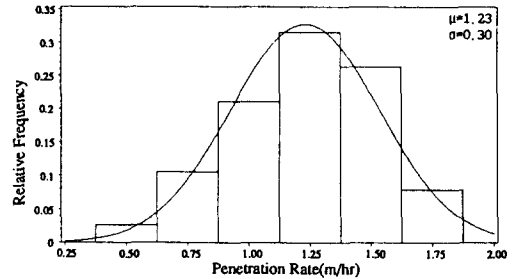


(c) All ground support (T-3)

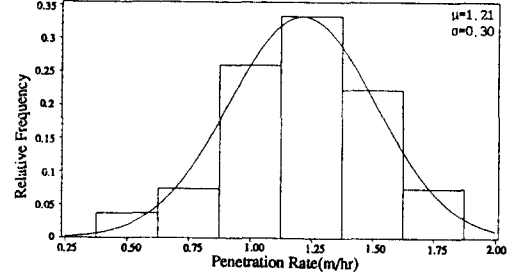
Fig. 12. Relationship between utilization and relative frequency with ground support types

말한다.

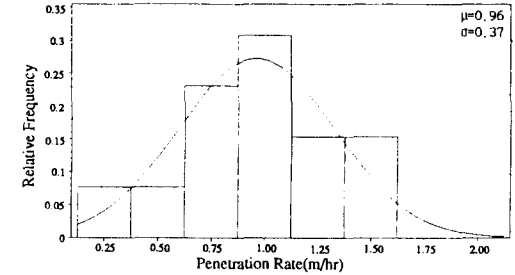
Fig. 12는 TBM 가동률이 지보형태에 따라 어떻게 변화하는 지를 조사하기 위하여 지보형태별로 가동률과 그 상대빈도를 표시한 것이다. 그림에서와 같이 지보형태별로 분리한 경우도 가동률의 분포 형태는 정규분포곡선과 유사하게 나타나고 있으며 shift당 평균가동률의 크기는 지보량의 증가에 따라 비례적으로 감소하고 있다. 이와같이 가동률 평균치가 완전지보 상태인 T-3 구간에서 제일 낮게 나타나고 있는 것은 지반이 불량하여 지보량을 증가시키면 지보설치시간이 상대적으로 길어지며 또한 커터 소모량이 심해져 커터 교체시간이 증가하기 때문으로 사료된다. 일반적으로 커터의 마모도는 암석의 경도와 강도가 매우 클 때, 또는 암반에 절리가 많아 커터에 하중



(a) Non support (T-1)



(b) Partial ground support (T-2)



(c) All ground support (T-3)

Fig. 13. Relationship between penetration rate and relative frequency with ground support types

재하-제거(loading-unloading)의 반복횟수가 많을 경우에 가장 높게 나타나는 것으로 알려져 있다. 여기서 Fig. 12(c)의 경우, (a), (b)와는 달리 가동률 분포가 정규분포곡선과 다소 차이를 보이는데 이는 시험구간의 지반조건이 비교적 양호하여 강제지보 등, 완전지보를 시행한 구간이 매우 짧아 통계분석에 이용된 shift 수가 극히 작았기 때문으로 판단된다.

Fig. 13은 shift당 순굴진속도의 분포추이도 지보형태별로 정규분포 곡선형태로 나타나는 지를 파악하기 위하여 Fig. 11에서 이용한 순굴진속도 자료를 재분류, 3 종류의 지보형태별로 shift당 순굴진속도의 크기와 상대발생 빈도와의 상관성을 도식한 것이다. 그림에서와 같이 분석에 이용된 shift 수가 매우 작았던 T-

3 구간, 즉 완전지보구간을 제외하고는 이들의 상관도가 정규분포곡선형태로 도시되고 있다. 따라서 각 지보형태별로 많은 shift 수를 갖게 되는 전체 공사기간을 고려해 보면 T-3의 경우도 정규분포곡선 형태로 도시될 것으로 예상되기 때문에 가동률과 함께 순굴진속도의 경우도 지보형태별로 정규분포곡선에 의한 해석이 가능할 것으로 판단된다.

또한, Fig. 12로부터 지보량이 증가할 수록 shift 당 평균 순굴진속도의 크기가 감소하는 경향을 보여 T-1에 비해 T-3의 경우, 약 20%의 순굴진속도 크기의 감소를 보이고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 TBM 시공현장에서는 동종의 암반에서 절리가 많으면 TBM의 순굴진속도가 낮아지는 것으로 알려져 있기 때문에, Fig. 13은 이를 입증해 주는 결과로 사료되며 이러한 순굴진속도의 규칙적인 감소정도는 향후 추가적인 사례연구를 통해 정량화 할 수 있을 것으로 본다.

5. 결 론

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) TBM의 순굴진속도는 암석의 일축압축강도, 인장강도, 합경도등과 같은 단순한 암석물성인자들과는 큰 상관성을 보이지 않으며 이러한 암석물성인자들을 위주로 하여 경험적으로 제안된 기존의 순굴진속도 예측식들과도 본 시험구간의 측정치가 큰 차이를 보이고 있어 TBM의 순굴진속도 예측을 위해서는 현장지반의 조건 이외에 TBM의 기계적인 조건과 가동조건도 함께 고려한 종합적인 분석이 뒤따라야 할 것으로 사료된다.

(2) TBM의 shift당 가동률, 순굴진속도 및 굴진률의 경우 그 상대 발생빈도와의 관계가 정규분포곡선(Normal distribution curve)으로 나타나고 있으므로 향후 추가적인 현장사례연구들을 통해 곡선형태를 결정하는 표준편차(σ)의 크기와 평균 상대발생빈도의 크기 등이 규명되면 TBM의 굴진속도는 정규분포곡선을 통해 예측이 가능해 질 것으로 판단된다.

(3) TBM 커터의 추력이 증가하면 순굴진속도도 증가하는 것이 일반적이거나 본 시험구간에서는 이러한 경향을 보이지 않고 있는데, 이는 시험구간에서의 추력증가가 동일지반조건 하에서 이루어진 것이 아니고 굴진 초기단계보다 지반이 강하여 특정한 순굴

진속도를 얻기 어려웠던 구간에 대해서만 추력을 증가시켰기 때문에 추력증가에 따른 순굴진속도의 증가경향을 보이지 않은 것으로 판단된다.

(4) 국내 시험구간의 경우 가동률을 떨어뜨리는 제일 큰 요소는 국외의 일반 경우와 같이 TBM의 보수 및 유지관리이나 그 점유율에서는 국외 조사치에 비해 약 25%나 높게 나타나며, 지반보강과 지보설치에 따른 TBM 가동지체률은 오히려 10% 정도 낮게 나타나고 있다. 이는 본 시험구간이 암반이 강도와 경도가 매우 큰 신선한 화강암으로 구성되어 있어 커터의 마모도가 높아 커터 교체시간이 상당히 늘어났던 반면, 지보량은 매우 적어 지보설치에 따른 가동지체시간이 줄어들었기 때문으로 판단된다.

감사의글

본 연구는 미국의 텍사스대학의 P. Nelson 교수가 주관하는 "Manufacturing Underground Space" 프로젝트의 일환으로 수행된 연구임을 밝힙니다. 아울러 짧은 지면을 통해서나마 본 연구에 필요한 TBM 굴진측정 현장을 제공해 주신 유원건설(주)의 경윤호 소장님께 감사 말씀 드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 과학기술처, 전단면 터널굴착기술 개발연구, 한국자원연구소, 1991.
- 2) 박철환, 김길수, "암반 기계굴착 공법의 적용연구", 터널과 지하공간, Vol. 2, 1992., pp. 177-189.
- 3) 배규진, 홍성완, 정하익, 이용수의 4인, "지하생활공간개발 요소기술연구-지반굴착기술분야(I)-", 한국건설기술연구원, 건기연 93-GE-161-1, 1993.
- 4) Farmer, I.W. & Glossop, N.H., "Mechanics of Disc Cutter Penetration", Tunnels & Tunnelling, 1980, 7, pp. 22-25.
- 5) Snowdon, R.A., Ryley, M.D. and Temporal, J., "A Study of Disc Cutting in Selected British Rocks", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 19, No. 3, 1982., pp. 107-121.
- 6) Nelson, P.P., "Tunnel Boring Machine Performance in Sedimentary Rock", Ph. D. Thesis, Cornell University, 1983.
- 7) Nelson, P.P., "Tunnel Boring Machine Performance Study", Report UMTA-MA-06-0100-84-1, DOT-TSC-UMTA-8-43, 1984.

- 8) Tarkoy, P.J., "Practical Geotechnical and Engineering Properties for Tunnel-Boring Machine Performance Analysis and Prediction", Transportation Research Record 1087., 1987., pp. 62-77.
- 9) Howarth, D.F., "Mechanical Rock Excavation Assessment of Cuttability and Borability", RETC Proceedings, Volume 1, 1987., pp. 145-164.
- 10) Parkers, D.B., "The Performance of Tunnel-Boring Machines in Rock", Research Report, CIRIA., 1988.
- 11) Martin, D., "TBM Tunnelling in Poor and very Poor Rock Conditions", Tunnels & Tunnelling, 1988. 3., pp. 30-39.
- 12) Pelizza, S., "Pilot Bore Excavation with TBM for the Design and Construction of Larger Tunnels", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 6, No. 2, 1991., pp. 185-189.