

TBM 터널 공정 분석시스템의 개발 및 적용

백승한¹⁾, 문현구^{2)*}

Development and Application of the Assessment System of TBM Tunnelling Procedure

Seung Han Baek and Hyun Koo Moon

Abstract Four assessment systems for planning and evaluation of TBM tunnelling are discussed, and their characteristics and input data are analyzed. Two of the systems are determined to be adequate for post-evaluation of TBM performance because the time, such as repair time, downtime, installation time and transport time, must be included for calculations. The others are adequate for pre-planning because the basic data of the systems consist of only the basic properties of rocks and rock masses, and the specification of TBM. In order to apply these assessment systems, a number of equations, graphs and charts are generally required, which seems to be very inconvenient and complicated. In this study, therefore, a user-friendly program operated on Windows system is developed, and each system can be selected by the corresponding input data. It will be possible for tunnel engineers to select a system according to their objectives and available input data, and to apply the system to TBM tunnel projects.

KeyWords TBM, Assessment system, Penetration rate, Advance rate, TBM utilization

초 록 본 연구에서는 TBM 터널의 설계 및 평가를 위한 4가지 분석시스템을 소개하고 그 특징들과 입력자료들을 비교분석하였다. 그 중 두가지 시스템은 수리 및 고장 등에 사용된 시간과 설치 및 이동시간 등이 입력자료로 사용되므로 터널 완료후 평가할 수 있는 방법이며, 나머지 두가지 시스템은 초기 기본적인 암석 및 암반 조건 그리고 TBM 제원 등으로 계산이 가능하므로 TBM 터널설계시 예측이 가능한 방법이다. 그러나 이러한 방법의 적용을 위해서는 많은 수식, 그래프 그리고 도표 등의 사용이 요구되므로 TBM 터널 평가를 위한 분석시스템의 이용이 매우 불편하고 복잡하다. 본 연구에서는 터널 기술자들이 쉽게 사용할 수 있도록 사용자 친화적인 윈도우용 프로그램을 개발하였으며, 개발된 프로그램은 입력자료가 서로 일치하는 각각의 방법을 적용할 수 있는 장점이 있다. 개발된 프로그램을 이용하여 다양한 프로젝트 현장 조건 및 목적에 맞는 분석시스템의 선택과 용이한 적용이 가능할 것으로 기대된다.

핵심어 TBM, 분석시스템, 관입률, 굴진율, TBM 가동률

1. 서 론

TBM 공법의 설계 및 시공은 암석 물성, 절리, 균열 상태, 응력 상태 등과 같은 지반조건과 기계의 성능 등에 관련된 조건에 크게 의존한다(Blindheim and Bruland, 1998). 이를 Fig. 1과 같이 암석의 물성, 암반의 지질학적 구조 및 특성, 기계의 구조적 및 기능적 성능으로 나눌 수 있다. 또한 TBM 터널 굴착은 좁은 의미에서

굴착과정 동안의 암석과 커터의 상호작용인 반면에 넓은 의미에서는 암반과 TBM 기계사이의 상호작용이 매우 중요하다(Moon, 2001a, 2001b).

TBM 터널 설계 기술자들은 암석 물성에 대한 많은 정보를 실내 및 현장 실험을 통해 구할 수 있고, 현장 지질조사 등에 의존하여 암반 물성 및 조건에 대한 정보를 얻을 수 있다. 또한 TBM 터널의 설계 및 평가는 터널 계획부터 터널의 완공까지 지속적인 작업이므로, 예비 설계로부터 시작하여 실시 설계 그리고 예상치 못한 지반 조건에 대처하기 위한 수정 및 보완으로 이어진다. 이러한 과정동안 암석과 암반에 대한 정보가 축적되고 기계의 성능에 대한 이해 증가되며, 터널 기술자들은 획득된 자료에 알맞은 다양한 설계 및 평가

¹⁾ 한양대학교 대학원 지구환경시스템공학과 박사과정

²⁾ 한양대학교 공과대학 지구환경시스템공학과 교수

*교신저자(Corresponding Author): hkmoon@hanyang.ac.kr

접수일: 2003년 10월 10일

심사 완료일: 2003년 12월 2일

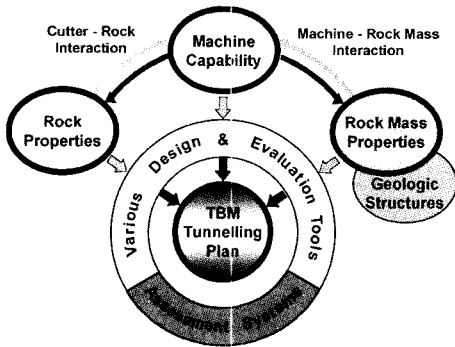


Fig. 1. TBM tunnelling plan

도구를 필요하게 된다.

일반적으로 TBM은 암석과 암반의 특정한 범위와 조건을 갖는 터널 프로젝트를 최상으로 수행하도록 제작되어지며, 이를 forward path라고 한다. 이와 반대로 다른 터널 현장에 사용되었던 TBM을 재사용하는 경우를 reverse path라고 하며, 최근 새로운 터널 공사가 증가함에 따라 TBM을 재사용하려는 수요가 증가하고 있다. 새로운 현장 조건에서의 터널 계획 및 관리를 위해서는 관입율(PR: penetration rate), 굴진율(AR: advance rate), 가동율(U: utilization)을 이용하여 TBM 수행 능력을 평가하는 것이 필요하다.

TBM 터널에 관한 연구는 Nelson 등(1985)과 Sanio (1985) 등의 이론 및 실험에 관한 연구와 Boniface (2000), Sapigni 등(2002), 박철환 등(2002), 조만섭 등(2003) 등의 실제 TBM 터널 자료의 분석 및 적용에 관한 연구로 나눌 수 있다. Nelson 등(1985)의 연구에 의하면 커터 관입에 의해 암석내 균열이 전파되어 파쇄 암편(chip)을 형성하므로 굴착효율은 파괴 물성(fracture material properties)과 관련이 있는 것으로 나타났으며, Sanio(1985)는 썩기관입 및 커터관입시험을 통하여 암반의 지질 구조적 특징이 강도와 변형특성뿐만 아니라 커터에 의한 굴착에 큰 영향을 미치므로 이방성과 불연속면이 TBM 굴진을 평가에 매우 중요한 고려사항이라고 제안하였다. Boniface(2000)는 현무암 지반 조건의 실제 터널 자료와 분석모델과의 비교를 통해 터널 수행 정도가 분석모델의 결과보다 우수하며, Sapigni 등(2002)의 연구에서는 TBM 현장 자료를 토대로 RMR 값과 TBM 수행 능력의 상관관계를 분석한 결과 RMR 값이 40~70 범위에서 수행 능력이 최대인 것으로 나타났다.

국내에서는 박철환 등(2002)이 NTNU에서 개발한 방법을 광주도시철도 1호선 현장에 적용하여 순굴착속

도와 추력과와의 관계를 분석하였으며, 분석 결과 실제 순굴착속도가 장비와 암반 특성을 고려한 이론적 속도와 유사하게 나타나 NTNU 해석법이 굴착속도를 예측하는 유용한 기법이라고 제안하였다. 조만섭 등(2003)은 국내 18개 TBM 굴착 자료를 분석하여 TBM 직경과 월 평균 굴진율의 상관식을 제시하였으며, 경부고속철도 터널을 대상으로 굴진속도를 여러 가지 모델들과 비교, 분석한 결과 상관식에 의한 굴진율이 경험적 모델에 비하여 작게 산정된 것으로 나타났다.

이러한 연구들은 암반 물성과 TBM 수행 능력의 관계 또는 암반 조건에 따른 추력 등을 결정하기 위한 연구와 각 TBM 터널 공정 분석시스템의 적용성 또는 적용사례 등에 관한 연구로 구분할 수 있다. TBM 터널의 설계와 평가를 위해 다양한 분석 모델들이 개발되어 왔으나 대부분의 분석시스템은 많은 수식과 그래프 그리고 도표 등을 이용해야 하므로 터널 기술자가 이용하기에 불편하고 복잡하다. 따라서 본 연구에서는 TBM 터널의 설계 및 평가를 위한 4가지 분석시스템을 비교 분석하여 기술자들이 쉽게 사용할 수 있는 사용자 친화적인 프로그램을 개발하고 실제 현장자료와 비교하였다.

2. AS-TBM 프로그램 개발

본 연구에서는 TBM 터널공정 분석을 위한 Persson 등(1993)에 의한 방법, NUST(Norwegian University of Science and Technology)에서 개발한 예측방법(NTH, 1994; Bruland, 1998), Jodl과 Stempkowski (1996)가 제안한 방법 그리고 Barton(1999, 2000)의 Q-TBM을 이용한 방법을 비교분석하였다. 이들 방법은 많은 식과 도표 및 그래프 등을 이용해야 하므로 실제 사용하기에 용이하지 않으므로 본 연구에서는 설계 및 현장 기술자가 쉽게 사용할 수 있도록 Window용 프로그램인 AS-TBM (Assessment System of TBM tunnelling)을 개발하였다 (Fig. 2~Fig. 5). AS-TBM은 pascal 언어를 사용하여 프로그램하였으며, 입력자료 창과 4가지 분석시스템 창으로 구성되어 있다. AS-TBM은 계산에 필요한 여러 가지 식과 그래프 및 도표를 프로그램 내부에 포함하고 있으므로 기본적인 입력자료를 이용하여 단계적으로 계산되어 최종적으로 관입율 및 굴진을 그리고 가동율을 결정할 수 있으며, 그래프 및 도표의 사이값은 내삽법에 이용하여 예측하도록 하였다. 개발된 AS-TBM은 입력자료가 서로 일치하는 각각의 방법을 적용할 수 있는 장점이 있으며, 선행 입력자료가 부족하더라도 계산에 필요한 전단계의 자료만으로 계산이 가능하도록 하였다.

2.1 분석시스템 [1]

Persson 등(1993)에 의해 제시된 방법을 수정 보완한 분석시스템 [1]은 Fig. 2에서와 같이 총 12개 입력자료 중 TBM 직경 D (m), 관입깊이 p_e (mm/rev) 그리고 TBM 회전을 계수 k_N를 이용하여 식 (1)과 같이 관입을 PR (m/hr)을 평가하고 이로부터 천공시간 T_B (hr/m)을 결정한다. 커터 교환시간 T_c (hr/m)는 TBM 직경 D (m), 커터당 교환시간 t_c (hr) 그리고 커터의 수명 λ (km)로부터 예측하고, 손실시간과 stroke l_s (m), 그리고 관입을 등으로부터 총 손실시간 T_L (hr/m)을 계산한다. 이로부터 최종적으로 굴진을 AR₁ (m/shift)과 AR₂ (m/hr) 그리고 TBM 가동율 U (%)를 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$PR = 0.06 p_e \frac{k_N}{D} \quad (1)$$

$$AR_1 = \frac{(T_S - t_s)}{T} = \frac{(T_S - t_s) p_e}{\left[\left(\frac{16.7}{k_N} \right) D + t_c \left(\frac{k_C}{\lambda} \right) D^a + T_L p_e \right]} \quad (2)$$

$$AR_2 = \frac{(T_S - t_s)}{T_S T} = \frac{(T_S - t_s) p_e}{\left[\left(\frac{16.7}{k_N} \right) D + t_c \left(\frac{k_C}{\lambda} \right) D^a + T_L p_e \right] T_S} \quad (3)$$

$$U = 100 \left(\frac{AR_2}{PR} \right) = \frac{(T_S - t_s) D}{0.06 k_N \left[\left(\frac{16.7}{k_N} \right) D + t_c \left(\frac{k_C}{\lambda} \right) D^a + T_L p_e \right] T_S} \quad (4)$$

여기서, T_S는 TBM 작업시간, t_s는 이동과 식사 등에 소요되는 고정 손실시간, k_C와 a는 커터가 지나간 총길이를 계산하는데 필요한 계수이며, 관입을 PR과 굴진을 AR₂는 단위시간당 거리 그리고 가동율 U는 백분율로 표현된다.

2.2 분석시스템 [2]

NUST에서 개발된 TBM 터널공정 예측 모델은 굴착 대상인 암반과 TBM으로 크게 두 그룹의 요소로 구성되어 있다(NTH, 1994; Bruland, 1998). Fig. 3과 같이 시스템 [2]의 계산에 필요한 기본적인 입력자료는 천공도지수 DRI, 커터수명지수 CLI, 석영함량 q (%), 터널 축과 불연속면이 이루는 각 α, 균열등급 FC, 균열군수 n_r, 추력 F_T (kN), 커터 직경 d (mm), 커터 간격 S (mm), 커터의 수 n_c, TBM 직경 D (m), TBM 회전을 N (rpm), stroke l_s (m) 그리고 regripping에 소요되는 시간 t_{reg} (hr)으로 요약할 수 있으며, TBM 굴착을 위한 암반조건을 결정하는 가장 중요한 인자는 등가균열계수(equivalent fracturing factor, k_f*), 천공도지수 그리고 커터수명지수이다. 암석 재료의 천공성(boreability)를 정량화하기 위하여 제시된 세가지 기본적인 시험은 S₂₀을 측정하는 취성도시험, SJ를 구하기 위한 천공모형시험 그리고 AVS를 위한 마모시험이다. 천공도지수는 암석의 S₂₀과 SJ 값으로부터 그리고 커터수명지수는 SJ와 AVS로부터 계산할 수 있다.

관입을 PR (m/hr)은 등가균열계수와 등가추력(equivalent cutter thrust) F_T*으로부터 관입깊이를 계산한 후 식 (1)을 이용하여 결정할 수 있다. TBM 가동율 U (%)는 여러 입력자료로부터 결정된 굴착시간, 커터 교환시간, 총 손실시간으로 식 (5)로 계산할 수 있으며, 굴진을 AR (m/hr)은 식 (6)과 같이 관입을 PR과 가동율 U의 관계

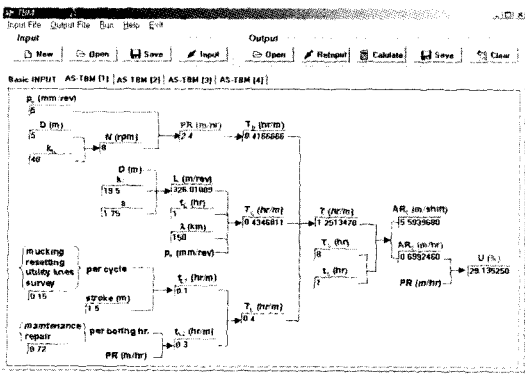


Fig. 2. Assessment system [1] of TBM tunnelling

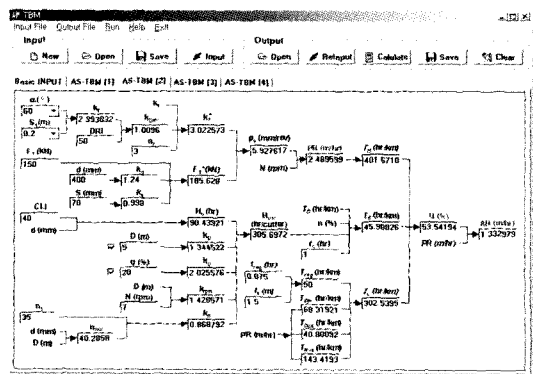


Fig. 3. Assessment system [2] of TBM tunnelling

로부터 예측할 수 있다.

$$U = 100 \left(\frac{T_B}{T_B + T_C + T_L} \right) \tag{5}$$

$$AR = U \frac{PR}{100} \tag{6}$$

여기서, T_B 와 T_C 그리고 T_L 은 km당 시간으로 계산되는 굴착시간, 커터 교환시간 그리고 총손실시간이다.

2.3 분석시스템 [3]

분석시스템 [3]은 Jodl과 Stempkowski(1996)에 의해 제시된 모델로서 Fig. 4에 나타내었다. 계산에 필요한 기본적인 입력자료는 천공도지수 DRI, 터널축과 불연속면이 이루는 각 α , 지반조건 GC, 추력 F_T (kN), TBM 직경 D (m), TBM 회전률 계수 k_N , km당 소요되는 재배치 시간(relocation time), 정지 및 정리 시간(standstill time), 수리 시간(repair time), 고장 시간(downtime), 설치 시간(installation time), 이동 시간(transport time)의 9가지로 구성되어 있다. 최대 커터 추력과 지반조건 및 천공도지수 등으로부터 관입깊이 p_c (mm/rev)를 추정하고 관입을 PR (m/hr)을 계산한다. 터널 굴착에 사용된 시간으로부터 식 (7)을 이용하여 가동율 U (%)을 계산하고, 그 중 U_2 를 이를 이용하여 식 (8)과 같이 시간별, 월별, 일별 굴진을 AR (m/hr), AR₃ (m/mon), AR₄ (m/day)을 평가할 수 있다.

$$U_1 = 100 \left(\frac{T_B}{T_W} \right) = 100 \left(\frac{T_B}{T_B + T_{RS}} \right)$$

$$U_2 = 100 \left(\frac{T_B}{T_T} \right) = 100 \left(\frac{T_B}{T_B + T_{RS} + T_{RD}} \right)$$

$$U_3 = 100 \left(\frac{T_B}{T_{T+}} \right) = 100 \left(\frac{T_B}{T_B + T_{RS} + T_{RD} + T_{IT}} \right) \tag{7}$$

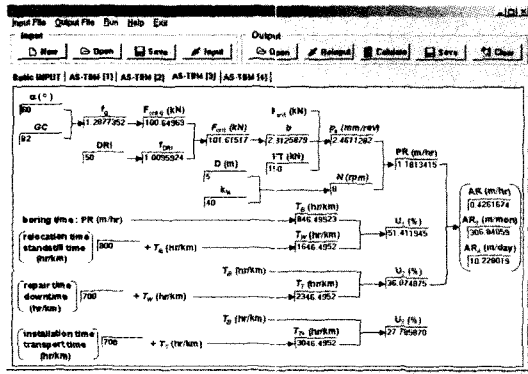


Fig. 4. Assessment system [3] of TBM tunnelling

$$AR = 0.01 U_2 PR = \left(\frac{1000}{T_B + T_{RS} + T_{RD}} \right)$$

$$AR_3 = 7.2 U_2 PR = 720 \cdot \left(\frac{1000}{T_B + T_{RS} + T_{RD}} \right)$$

$$AR_4 = 0.24 U_2 PR = 24 \cdot \left(\frac{1000}{T_B + T_{RS} + T_{RD}} \right) \tag{8}$$

(8)

여기서 T_B 는 굴착시간, T_W 는 고장 및 수리시간을 제외한 총작업시간, T_T 는 TBM 설치 및 이동시간을 제외한 총시간, T_{T+} 는 총소요시간이다.

2.4 분석시스템 [4]

Barton(1999)에 의해 제시된 분석시스템 [4]는 터널링에 대하여 TBM 작업 수행에 대한 Q 값을 수정 보완한 Q_{TBM} 을 사용하였으며, 그 계산과정을 나타낸 프로그램을 Fig. 5에 나타내었다. 시스템 [4]의 계산에 필요한 기본적인 입력자료는 Q 값, 일축압축강도 σ_c (MPa), 점하중강도 I_{50} (MPa), 단위중량 γ (g/cm³), 석영함량 q (%), 공극률 n (%), 커터수명지수 CLI, 추력 F_T (tonf), 터널막장면에서의 응력 σ_θ (MPa), TBM 직경 D (m) 그리고 터널연장 L_t (km)으로 구성되어 있다.

Barton에 의해 개발된 Q 시스템은 천공 및 발파 터널에 널리 사용되어 왔으며, 이를 TBM 터널에 사용하기 위하여 식 (9)에 의해 수정된 Q_{TBM} 을 사용하였다. Q_{TBM} 을 이용하여 관입을 PR (m/hr)을 식 (10)에 의해 계산할 수 있으며, 암반분류 Q값과 관입을 PR로부터 굴진을 AR (m/hr) 및 TBM 가동율 U (%)를 식 (11)과 식 (12)에 의해 각각 계산할 수 있다.

$$Q_{TBM} = Q \left(\frac{\text{SIGMA}}{F_T^{10}/20^9} \right) \left(\frac{20}{\text{CLI}} \right) \left(\frac{q}{20} \right) \left(\frac{\sigma_\theta}{5} \right) \tag{9}$$

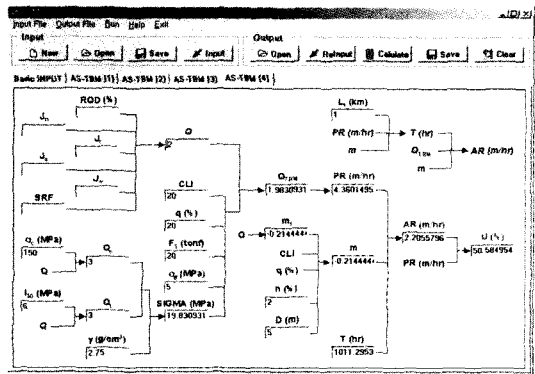


Fig. 5. Assessment system [4] of TBM tunnelling

$$PR = 5 (Q_{TBM})^{-0.2}$$

$$= 5 \left[Q \left(\frac{\text{SIGMA}}{F_T^{10}/20^9} \right) \left(\frac{20}{\text{CLI}} \right) \left(\frac{q}{20} \right) \left(\frac{\sigma_\theta}{5} \right) \right]^{-0.2} \quad (10)$$

$$AR = PR (T)^m = 5 (Q_{TBM})^{-0.2} (T)^m \quad (11)$$

$$U = 100 \left(\frac{AR}{PR} \right) = 100 (T)^m \quad (12)$$

3. 영향인자 분석

분석시스템에 사용되는 입력자료를 Table 1과 같이 일정한 범위내에서 변화시키면서 매개변수 분석을 수행하였다. 하나의 입력자료를 변화시킬 경우 나머지 자료들은 문헌에 언급된 일반적인 기준값으로 고정하였다.

3.1 분석시스템 [1]

입력자료중에서 $\{p_e, D, k_N\}$ 는 PR과 직접적으로 관련되고, $\{k_C, a, t_c, \lambda\}$ 와 $\{p_e, D\}$ 는 T_B 에 영향을 주며,

$\{T_{mrus}, T_{ms}, I_s\}$ 와 PR은 T_L 의 결정에 영향을 주므로써 PR 및 U의 결정에 영향을 미친다. 각 입력자료의 기준값은 p_e 는 5 mm/rev, D 는 6 m, λ 는 150 km, k_N 은 40, k_C 는 19.5, a 는 1.75, t_c 는 1 hr, T_L 은 0.5 hr/m, T_S 는 8 hr 그리고 t_S 는 1 hr을 적용하였다.

시스템 [1]의 경우 여러 입력자료중 p_e 와 D 의 영향이 비교적 크게 나타났으며, 먼저 p_e 에 대한 PR, AR_2 그리고 U의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 식 (1)과 같이 p_e 와 PR은 선형 비례관계이며, AR_2 는 식 (2)에서 p_e 가 분모에 비해 분자의 영향을 많이 미치므로 증가하는 양상을 보인다. p_e 가 2 mm인 경우 PR은 0.8 m/hr, AR_2 는 0.27 m/hr이고 p_e 가 10 mm인 경우 PR은 4 m/hr, AR_2 는 0.83 m/hr이다. 따라서 U는 식 (3)과 같이 PR에 대한 AR_2 의 비로 나타내므로 p_e 가 2 mm일 때 33.7%에서 p_e 가 10 mm일 때 20.8%로 감소하였다.

Fig. 7은 D에 대한 PR, AR_2 그리고 U의 그래프이다. D가 3 m일 경우 PR은 4 m/hr와 AR_2 는 0.94 m/hr이고 D가 15 m일 경우 PR은 0.8 m/hr와 AR_2 는 0.19 m/hr

Table 1. Input data used for the parametric study of four assessment systems

system [1]		system [2]		system [3]		system [4]	
input	range	input	range	input	range	input	range
p_e (mm/rev)	2~10	α (°)	0~90	α (°)	0~90	Q	0.001~1000
D (m)	3~15	S_f (m)	0.05~1.6	GC	B1~C2	σ_c (MPa)	20~300
λ (km)	100~500	DRI	10~90	DRI	10~90	I_{50} (MPa)	0.2~50
k_N	30~50	CLI	10~130	F_T (kN)	100~250	γ (g/cm ³)	2~3
		F_T (kN)	100~250	D (m)	2~13	CLI	10~130
		D (m)	2~13	k_N	30~50	q (%)	5~100
						F_T (tonf)	10~35
						σ_θ (MPa)	2~20
						n (%)	0.5~5
						D (m)	3~13

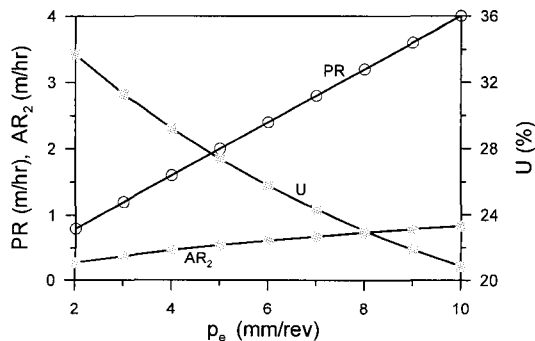


Fig. 6. Variation of PR, AR_2 and U with p_e in system [1]

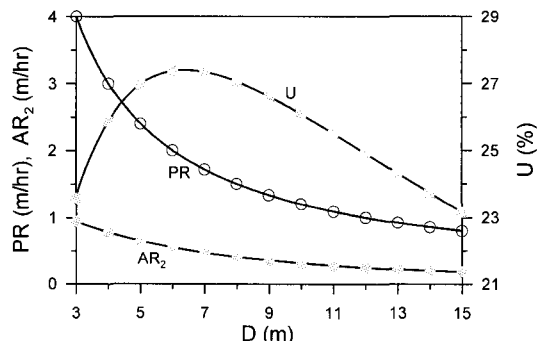


Fig. 7. Variation of PR, AR_2 and U with D in system [1]

로 나타났으며, 따라서 직경 D가 클수록 PR 및 AR₂는 모두 감소하였다. 반면에 U는 D가 3 m일 때 23.5 %에서부터 증가하여 D가 6 m일 때 27.4 %로 최대가 되며, 다시 감소하여 D가 15 m일 때 23.2 %로 감소하였다.

3.2 분석시스템 [2]

매개변수 α , 절리간격 S_f (m), DRI, F_T , CLI 그리고 D에 대한 PR, AR 그리고 U의 변화를 분석한 결과 α , S_f , F_T 그리고 D의 영향이 비교적 크게 나타났다. 입력 자료의 기준값은 α 는 60°, S_f 는 0.2 m, DRI는 50, CLI는 40, F_T 는 150 kN, D는 6 m, n_f 는 1, d는 400 mm, S는 70 mm, q는 20%, N은 7 rpm, n_c 는 42개, t_c 는 1 hr, t_{reg} 는 0.083 hr 그리고 l_s 는 1.5 m이다.

Fig. 8은 α 에 대한 PR, AR 그리고 U의 변화를 도시한 그래프이다. 모든 균열등급(fracture class)에서 α 가 60° 일 때 k_r^* 및 p_e 가 최대가 되므로 PR도 최대가 된다. 반면에 PR이 증가함에 따라 T_B 와 T_C 그리고 T_L 은 모두 감소하므로 식 (5)의 분자의 감소에 비해 분모의 감소가 크므로 α 가 증가함에 따라 U은 감소하여 α 가 60°에서 최소값을 가지며, 그 이후 다시 증가하는 경향을

보인다. AR은 PR과 U의 관계를 나타낸 식 (6)로부터 평가할 수 있으며, PR과 그 경향이 유사하게 나타났다.

Fig. 9는 단일 절리군(균열군)을 기준으로 한 경우 S_f 에 따른 PR, AR 그리고 U의 관계를 나타내었다. S_f 가 50 mm, 800 mm, 1600 mm일 때 PR은 2.52 m/hr, 1.28 m/hr, 0.39 m/hr로 감소하고 AR은 1.35 m/hr, 0.82 m/hr, 0.31 m/hr로 감소하는 반면에 U는 53.4%, 63.8%, 78.9%로 증가하였다. 또한 S_f 가 증가함에 따라 T_B , T_C , T_L 모두 증가하였다.

F_T 에 대한 PR 및 AR 그리고 U의 변화를 나타낸 Fig. 10과 같이 F_T 가 80 kN, 150 kN, 240 kN일 때 PR은 1.33 m/hr, 2.30 m/hr, 4.15 m/hr로 증가하고 AR은 0.84 m/hr, 1.26 m/hr, 1.95 m/hr로 증가하는 반면에 U는 63.2%, 54.8%, 46.9%로 감소하였다

PR 및 AR 그리고 U에 대한 D의 영향을 나타낸 Fig. 11에서와 같이 PR은 D에 관계없이 2.30 m/hr로 일정하며, 이는 D가 PR 계산에 영향을 주지 못하기 때문이다. 그러나 D가 3, 5, 9, 13 m일 때 AR은 1.31 m/hr, 1.26 m/hr, 1.18 m/hr, 1.11 m/hr로 미소하게 감소하며, U는 56.8%, 54.8%, 51.1%, 48.5%로 감소하였다.

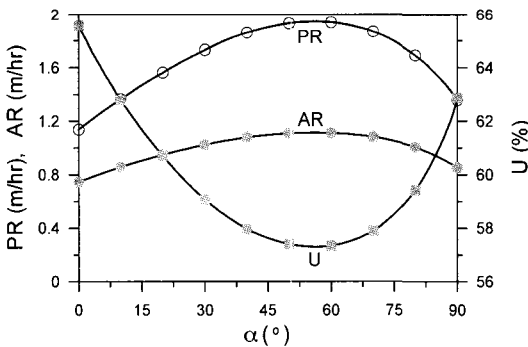


Fig. 8. Variation of PR, AR and U with angle α in system [2]

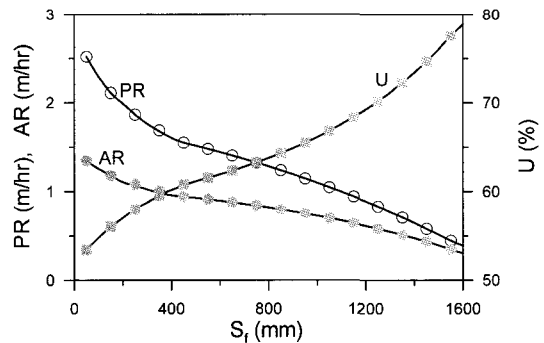


Fig. 9. Variation of PR, AR and U with S_f in system [2]

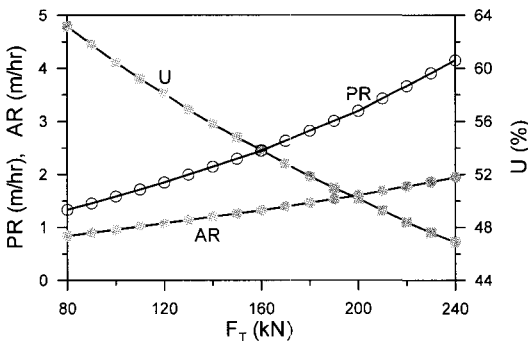


Fig. 10. Variation of PR, AR and U with F_T in system [2]

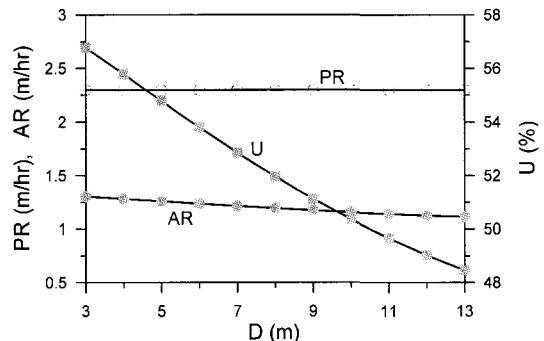


Fig. 11. Variation of PR, AR and U with D in system [2]

3.3 분석시스템 [3]

분석시스템 [3]에서는 α , GC, DRI, F_T , D 그리고 k_N 에 대한 PR, AR 그리고 U의 변화를 분석한 결과, PR 및 U 등에 비교적 영향이 큰 입력변수는 GC, F_T , D으로 나타났다. 그 중 F_T 와 D에 대한 PR과 AR 그리고 U의 영향을 Fig. 9와 Fig. 10에 도시하였다. 입력자료의 기준값은 α 는 60°, GC는 B2, DRI는 50, F_T 는 150 kN, D는 5 m, k_N 는 40, relocation 및 standstill time은 800 hr/km, repair time 및 downtime은 700 hr/km 그리고 installation 및 transport time은 700 hr/km을 적용하였다.

Fig. 12에서와 같이 F_T 가 증가할수록 PR 및 AR은 증가하지만 U는 감소하였다. 그 값은 F_T 가 80 kN, 150 kN, 240 kN일 때 PR은 0.28 m/hr, 1.18 m/hr, 3.50 m/hr로 증가하고 AR은 0.20 m/hr, 0.43 m/hr, 0.56 m/hr로 증가하는 반면에 U_2 는 70.7%, 36.1%, 16.0%로 감소하였다.

PR 및 AR 그리고 U_2 에 대한 D의 영향을 나타낸 Fig. 13은 Fig. 12와 반대 경향을 나타낸다. 즉, D가 3, 5, 9, 13 m일 때 PR은 1.97 m/hr, 1.18 m/hr, 0.66 m/hr, 0.45 m/hr로 감소하고 AR은 0.50 m/hr, 0.43 m/hr,

0.33 m/hr, 0.27 m/hr로 감소하나 U_2 는 25.3%, 36.1%, 50.4%, 59.5%로 증가하였다.

3.4 분석시스템 [4]

Barton에 의해 개발된 분석시스템 [4]의 매개변수 연구에 사용된 변수는 Q값, CLI, q, F_T , n 그리고 D이다. 입력자료의 기준값은 Q는 2, σ_c 는 150 MPa, I_{50} 은 6 MPa, γ 는 2.75 g/cm³, CLI는 20, q는 20%, F_T 는 20 tonf, σ_θ 는 5 MPa, n은 2%, D는 5 m 그리고 L_1 는 1 km를 적용하였다. 이 경우 F_T , Q, q 등의 영향이 크게 나타났으며, 이중 Q와 F_T 에 대한 영향을 Fig. 14와 Fig. 15에 도시하였다.

Fig. 14에서와 같이 Q가 증가할수록 PR은 감소하고 AR은 Q가 1일 때 최대가 되며, U는 Q가 10에서 최대를 나타낸다. Q가 0.1, 1, 10, 1000일 때 PR은 9.69 m/hr, 5.25 m/hr, 2.84 m/hr, 0.83 m/hr로 감소하고 AR은 1.98 m/hr, 2.61 m/hr, 1.65 m/hr, 0.43 m/hr로 나타났다. Q가 0.1, 1, 10, 1000일 때 U는 20.41%, 49.7%, 58.26%, 51.3%로 나타났다. 암반상태가 매우 불량한 경우 터널의 불안정성으로 인해 굴진하기에 매우 위험하므로 PR을 감소시키는 것이 일반적이며, 따라서 Q_{TBM} 이

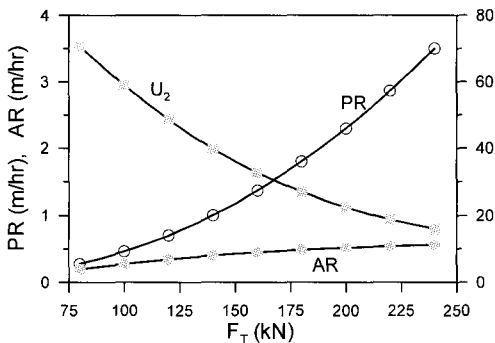


Fig. 12. Variation of PR, AR and U_2 with F_T in system [3]

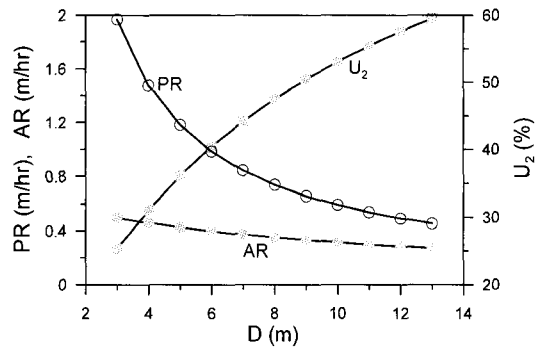


Fig. 13. Variation of PR, AR and U_2 with D in system [3]

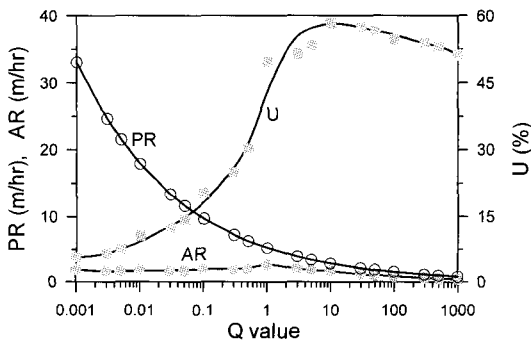


Fig. 14. Variation of PR, AR and U with Q value in system [4]

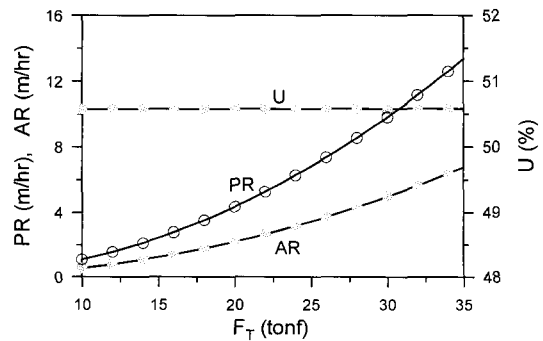


Fig. 15. Variation of PR, AR and U with F_T in system [4]

1이하의 경우 이론적으로 매우 높게 나타나는 PR은 의미가 없다고 판단된다.

F_T 에 대한 영향은 Fig. 15에서와 같이 F_T 가 증가할수록 PR 및 AR은 증가하지만 U는 일정하게 나타났다. 이는 PR과 AR의 증가 비율이 동일하기 때문이다. F_T 가 10 tonf, 20 tonf, 35 tonf일 때 PR은 1.09 m/hr, 4.36 m/hr, 13.35 m/hr로 증가하고 AR은 0.55 m/hr, 2.21 m/hr, 6.76 m/hr로 증가하지만, U는 50.6%로 항상 일정하게 나타났다.

4. 현장자료 분석 및 적용

본 연구에서는 실제 현장자료와 분석시스템의 비교를 위하여 영천댐 도수터널 자료를 이용하였다. 총 33 km 연장의 영천댐 도수터널은 3.5 m 직경을 가진 TBM을 이용한 기계식 굴착공법과 재래식 일반공법을 병행하였으며, 1991년에 공사가 시작되고 전체공사의 준공은 1997년 말로 예정되어 있었으나, 시공중 지반조건 불량으로 공기가 일부 연장되었다. 본 프로젝트를 위해 설계된 TBM은 오스트리아 VOEST-ALPINE BERGTECHNIK에서 제작한 ATB 35 HA로서 TBM 주부분의 접근이 용이하고 커터헤드 바로 뒤에서 거의 동시에 록볼트 설치가 가능하다는 특징이 있으며, 그 제원은 Table 2와 같다.

4.1 현장자료 분석결과

영천댐 도수터널의 1992년 7월부터 1998년 8월까지 87개월 동안 작업한 총 굴진거리는 16737.7 m이며, 실제 작업이 이루어진 67개월에 대해 평균 월별 굴진거리는 약 249.8 m이다. 1993년 6월(93.5.18.~7.21)은 TBM 3사갱 정비작업으로 인해, 1997년 3월~5월에는 민원의 발생으로 TBM 굴진작업이 이루어지지 않았다. 그리고 1994년 11월~1995년 6월까지와 1998년 1월~5월까

지는 TBM 굴진에 관한 자료가 없으며, 1999년 5월에는 봉락구간 발생으로 지반 보강작업을 수행하였다. 1999년 7월에는 TBM 굴진 가능여부를 위한 막장 전방의 지질조사를 실시하였으며, 1999년 8월에는 TBM 굴착이 타당성이 없다고 판단하여 장비해체 작업이 수행되었다.

Fig. 16은 월별 평균 관입율을 나타낸 그래프이다. 1992년 6월의 PR이 3.52 m/hr로 가장 높으며, 87개월 중 실제 작업이 이루어진 67개월에 대한 평균 PR은 1.93 m/hr이다. 1992년 6월~12월, 1993년 5월, 1998년 8월, 1999년 3월과 6월에 2.5 m/hr 이상의 비교적 높은 관입율을 나타낸다.

월별 평균 굴진율은 나타낸 Fig. 17에서와 같이 1999

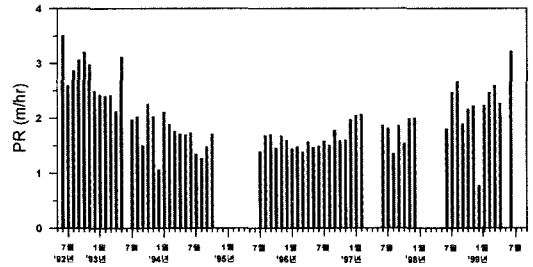


Fig. 16. Monthly penetration rate calculated for Youngchun water tunnel

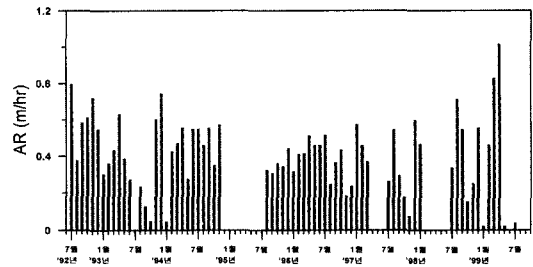


Fig. 17. Monthly advance rate calculated for Youngchun water tunnel

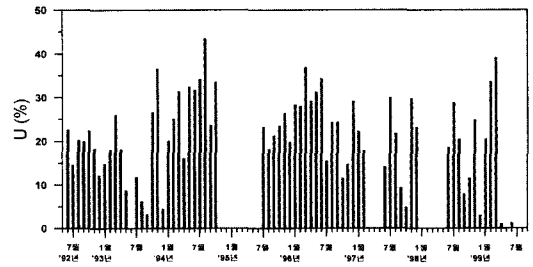


Fig. 18. Monthly utilization calculated for Youngchun water tunnel

Table 2. The specification of the ATB 35 HA TBM

Bore diameter	3.50 m
Weight of machine	180 ton
Weight of back-up system	210 ton
Cutting-head speed	12.5 rpm
Crowding force	6280 kN
Maximum stroke	1500 mm
Minimum curve radius	150 m
Cutting-head drives	4×240 kW
Total installed capacity excl. customer's own equipment	about 1100 kW

년 3월에 1.02 m/hr로 가장 큰 값을 나타내며, 총 공사 기간의 평균 굴진율은 0.41 m/hr로 나타났다. 1992년 6월과 11월, 1993년 4월과 12월, 1998년 8월, 1999년 2월과 3월에 0.6 m/hr 이상의 비교적 큰 값을 보이며, 이는 지반 조건이 양호하여 굴진량이 많은 반면에 커터 소모량과 기계 고장 및 보강 시간이 적어 전체 소요시간이 적음을 의미한다.

마지막으로 Fig. 18에는 월별 평균 TBM 가동율을 나타내었다. 터널링에 소요된 전체시간에 대한 굴진에 소요된 시간의 비인 TBM 가동율은 1994년 8월에 43.5%로 가장 큰 값을 나타내며, 총 공사기간의 평균은 약 21.12%로 나타났다. 높은 TBM 가동율은 TBM 기계의 고장이 적고 지반조건 역시 양호하여 기타 소요되는 시간이 적다는 것을 의미한다.

4.2 AS-TBM에 의한 분석결과

본 현장자료를 이용하여 분석시스템의 입력변수를 추정해보면 시스템 [1]의 경우 관입깊이는 p_e 는 약 2.8 mm/rev일 때 관입율이 1.92 m/hr로 나타나며, 굴진율은 약 0.49 m/hr 그리고 가동율은 약 25.5%로 나타나 비교적 유사한 결과를 보인다.

시스템 [2]에서는 α , S_r , DRI, CLI, n_r , q , 그리고 t_c 를 현장 작업일지에서 확인할 수 없었으며, 따라서 기준값을 적용하였다. 주어진 입력자료는 n_c 는 24개, N 은 12.5 rpm, D 는 3.5 m, S 는 70 mm 그리고 d 는 430 mm를 적용한 후 t_{reg} 는 1 hr로 가정하였다. F_T 를 100 kN으로 가정한 경우 p_e 는 약 2.85 mm/rev로 계산되고 관입율은 약 2.13 m/hr로 나타나 현장 결과와 유사하며, 굴진율 및 가동율은 0.69 m/hr와 32.3%로 나타났다. 시스템 [2]를 이용한 예측도 현장자료에 비해 높은 굴진율과 가동율을 보여주고 있다.

현장조건 자료의 나머지 입력자료를 기준값으로 적용하고 F_T 를 160 kN으로 가정한 시스템 [3]의 경우 p_e 는 약 2.86 mm/rev로 계산되고 관입율은 1.96 m/hr, 굴진율은 0.5 m/hr, 가동율 U_2 는 25.4%로 비교적 유사하게 나타났다.

마지막으로 TBM 제원에 대한 자료와 그 외 기준값을 입력한 시스템 [4]의 경우 F_T 를 13 tonf일 때 관입율

이 약 1.84 m/hr로 현장결과와 유사하게 나타났으며, 굴진율은 약 0.98 m/hr 그리고 가동율은 약 53%로 현장 결과보다 매우 높게 예측되었다.

본 TBM 현장 자료를 관입율에 맞추어 계산한 결과를 Table 3에 나타내었으며, 본 연구에서 소개한 분석 시스템에 의해 평가된 관입율 및 굴진율 그리고 가동율이 현장 결과에 비해 높은 값을 나타내고 있다. 이는 현장 자료에서 TBM 고장 수리 및 이동 및 식사로 분류되는 손실시간의 기타로 분류되는 시간이 큰 비중을 차지하고 있기 때문으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서 TBM 터널 공정을 분석할 수 있는 방법을 소개하고 비교분석하였으며, 이를 기술자들이 쉽게 사용할 수 있도록 사용자 친화적인 프로그램 개발 및 현장자료를 적용하였다. 본 연구를 도출된 주요 결론을 요약하면 다음과 같다.

TBM 터널의 설계 및 평가를 위한 4가지 TBM 터널 공정 분석시스템은 많은 수식과 그래프 그리고 도표 등을 사용해야 하므로 이용이 불편하고 복잡하다. 따라서 본 연구에서는 사용자가 쉽게 이용할 수 있는 윈도우용 프로그램을 개발하였으며, 이를 통해 설계 및 현장 기술자도 보다 쉽게 TBM 터널 공정을 예측 및 평가할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 네가지 분석법은 한번에 관리할 수 있으므로 획득된 입력자료에 맞는 분석방법을 선택할 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서 언급한 시스템중에서 분석시스템 [1]과 [3]은 수리 및 고장 등에 사용된 시간과 설치 및 이동시간 등이 입력자료로 사용되므로 TBM 터널 완공후 평가 시스템으로 적용할 수 있으며, 시스템[2]와 [4]는 초기 기본적인 암석 및 암반 조건 그리고 TBM 제원 등으로 계산이 가능하므로 TBM 터널설계시 예측이 가능한 방법이다.

관입율, 굴진율 그리고 가동율에 대하여 분석시스템 [1]에서는 p_e 와 D 의 영향이 크게 나타났으며, 관입깊이와 TBM 직경이 증가할수록 관입율 및 굴진율은 감소하였다. NUST에서 개발된 분석시스템 [2]의 경우 S_r ,

Table 3. Comparison of PR, AR and U

	Field data	System [1]	System [2]	System [3]	System [4]
PR (m/hr)	1.93	1.92	2.13	1.96	1.84
AR (m/hr)	0.41	0.49	0.69	0.5	0.98
U (%)	21.12	25.5	32.3	25.4	53

F_T , α , D 의 영향이 크게 나타났으며, α 가 60° 일 때 관입율 및 굴진율은 최대가 되고 반면에 가동율은 최소로 나타났다. 또한 S_f 가 증가할수록 관입율 및 굴진율은 감소하지만, F_T 가 증가할수록 관입율 및 굴진율은 증가하였다. 분석시스템 [3]에서 주요 영향인자는 F_T , D , GC , α 등이며, F_T 가 증가함에 따라 관입율은 증가하는 반면에 D 가 증가함에 따라 관입율은 감소하였다. 마지막으로 분석시스템 [4]에서는 F_T , Q , q , CLI 등이 관입율 및 굴진율 등에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

영천 도수로 TBM 현장 자료를 분석한 결과, 실제 작업이 이루어진 기간의 평균 월별 굴진거리의 약 249.82 m이며, 평균 관입율은 1.926 m/hr로 나타났다. 굴진율은 0.407 m/hr로서 일반적인 값보다 작은 값을 나타내며, 평균 가동율도 21.12%로 높지 않은 값을 보였다. 이는 작업일지상에 기타로 분류되는 시간 비율이 크게 나타남에 기인한 것으로 판단된다.

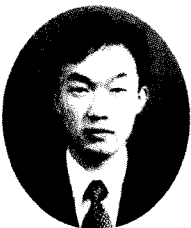
참고문헌

1. 박철환, 박찬, 전양수, 박연준, 2002, 암반층에서 Shield TBM의 관입율과 추력과의 관계, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 12.2, 115-119.
2. 조만섭, 우동찬, 김경곤, 이진무, 2003, 국내 TBM 굴진속도 산정을 위한 경험적 방법들의 적용성 분석, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 13.4, 260-269.
3. Barton, N., 1999, TBM Performance Estimation in Rock Using QTBM, Tunnels & Tunnelling International, 31.9, 30-34.
4. Barton, N., 2000, TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock, Balkema, p.172.
5. Blindheim, O.T. and Bruland, A., 1998, Boreability Testing, in Norwegian TBM Tunnelling, Norwegian Soil and Rock Engineering Association, Publication No. 11, 21-27.
6. Boniface, A., 2000, Tunnel Boring Machine Performance in Basalts of the Lesotho Formation, Tunnelling and Underground Space Technology, 15.1, 49-54.
7. Bruland, A., 1998, Prediction Model for Performance and Costs, Norwegian TBM Tunnelling, Norwegian Soil and Rock Engineering Association, Publication No. 11, 29-34.
8. Jodl, H.G. and Stempkowski, R., 1996, Operations Research Aspects of TBM Drives-Case Study of the Wienerwald tunnel, Proc. Int. Lecture Series TBM Tunnelling Trends, Austria, 69-79.
9. Moon, H.K., 2001a, A Study on the Assessment System of TBM Tunneling Procedure, The International Symposium on Application of Geosystem Engineering, 93-104.
10. Moon, H.K., 2001b, A Comparative Study on Five Assessment Systems of TBM Tunnelling, Geosystem Engineering, 4(2), 61-69.
11. Nelson, P.P., Ingraffea, A.R., and O'Rourke, T.D., 1985, TBM Performance Prediction Using Rock Fracture Parameters, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 22.3, 189-192.
12. NTH, 1994, Hard Rock Tunnel Boring, Project Report 1-94, p. 164.
13. Persson, P., Holmberg, R. and Lee, J., 1993, Rock Blasting and Explosives Engineering, CRC Press, 43-53.
14. Sanio, H.P., 1985, Prediction of the Performance of Disc Cutters in Anisotropic Rock, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech, 22.2, 153-161.
15. Sapigni, M., Berti, M., Bethaz, E., Busillo, A. and Cardone, G., 2002, TBM performance estimation using rock mass classifications, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 39.6, 771-788.

백승환

1996년 한양대학교 공과대학
자원공학과 공학사
1998년 한양대학교 대학원 자원공학과
공학석사

Tel: 02-2299-3012
E-mail: stbaek@hrg.hanyang.ac.kr
현재 한양대학교 지구환경시스템공학과
박사과정



문현구

1974년 서울대학교 공과대학
자원공학과 공학사
1983년 Univ. of Utah 암석역학
공학석사
1987년 Univ. of Utah 암석역학
공학박사

Tel: 02-2290-0413
E-mail: hkmoon@hanyang.ac.kr
현재 한양대학교 지구환경시스템공학과
교수

