

TBM의 관입속도 예측을 위한 경험적 모델의 비교

Comparison of Empirical Model for Penetration Rate Prediction using Case History of TBM Construction

한 중근 ¹	Han, Jung-Geun	김 중술 ²	Kim, Jong-Sul
이 양규 ³	Lee, Yang-Kyu	홍기권 ^{4*}	Hong, Ki-Kwon

ABSTRACT

This paper describes prediction results of penetration rate using case history in order to compare empirical models for penetration rate prediction of TBM. The reasonable empirical model is evaluated by comparison with prediction results and measured result. The penetration rate prediction is applied in separate empirical models considering rock characteristics and mechanical characteristics of TBM. The rock of applied filed had almost gneiss and its unconfined compressive strength was irregular due to the exist of weak zones and joint. In prediction results using unconfined compressive strength, Graham's model (1976) had impractical result when it had lower strength. NTNU model (1998) of the separate empirical models used in average penetration rate had the highest accuracy by comparison with the others, because it is a reasonable model which has rock characteristics and mechanical characteristics of TBM. However, Tarkoy's model (1986) based on unconfined compressive strength correspond with the measured values in field. Therefore, it should be considered a rock type, geological characteristic and mechanical characteristic of TBM at prediction of penetration rate.

요 지

본 연구에서는 TBM의 관입속도 예측에 대한 경험적 모델을 비교하기 위하여 현장사례를 이용하여 관입속도를 예측하였으며, 예측결과와 시공 시의 실측치를 비교·분석하여 합리적인 모델을 평가하였다. 관입속도 예측은 일축압축강도를 이용한 모델과 암석의 특성 및 TBM의 장비 특성을 고려한 모델로 적용하였다. 사례현장은 대부분 편마암으로 구성되어 있으며, 절리가 발달되어 약선대가 존재하기 때문에 암석의 일축압축강도가 불규칙적으로 나타났다. 일축압축강도를 이용한 예측결과에서 Graham(1976)의 모델은 낮은 강도의 경우, 비현실적인 예측결과가 나타나는 것으로 분석되었다. 평균 관입율을 이용한 각 모델들의 신뢰성을 분석한 결과, 암석의 특성 및 TBM 기계적 특성을 합리적으로 반영한 NTNU 모델(1998)이 가장 높은 것으로 확인되었다. 그러나 실측치와 비교한 결과에서는 일축압축강도를 바탕으로 예측하는 Tarkoy의 모델(1986)이 사례현장의 특성과 일치하는 것으로 분석되었다. 즉, TBM의 관입속도 예측 시에는 대상 암종, 지질특성 및 TBM의 장비 특성을 모두 고려하여 다양한 모델을 이용한 합리적인 예측이 수행되어야 한다.

Keywords : TBM (Tunnel Boring Machine), Tunnelling, Penetration rate, Advance rate, Prediction model

1. 서 론

우리나라는 1970년대 이후 급속한 경제발전이 이루어

지면서 삶의 질 향상에 대한 기대치 증가에 기인하여, 환경친화적인 건설에 대한 요구가 높아지고 있는 실정이다. 이에 터널시공에 있어서도 기존의 발파공법에 비하여 경

1 정회원, 중앙대학교 사회기반시스템공학부 부교수 (Member, Associate Professor, School of Civil and Environmental Engrg., Urban Design and Studies, Chung-Ang Univ.)
2 비회원, 중앙대학교 건설대학원 졸업 (Non-Member, Formerly Graduate Student, Graduate School of Construction Engrg., Chung-Ang Univ.)
3 비회원, 대림대학교 토목환경과 교수 (Non-Member, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Daelim University College)
4* 정회원, 중앙대학교 그린테크연구소 전임연구원 (Member, Associate Researcher, Green Tech Institute, Chung-Ang Univ., E-mail: kkhong@wm.cau.ac.kr)

제성 및 환경성에 대한 장점을 가지고 있는 기계화 시공의 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 즉, 기계화 시공은 소음 및 진동의 저감효과가 있으며, 시공 시에 주변지반의 손상이 적기 때문에, 지보재와 같은 시공물량을 감소시킬 수 있는 장점이 있다(Friant and Ozdemir, 1993).

국내의 터널시공 시 사용되는 기계식 굴착방법인 TBM (Tunnel Boring Machine)공법은 현재까지 약 20년 이상 적용되면서 그 성과를 인정받았으며, 초기에는 통신구 및 전력구 터널과 같은 소단면에서부터 최근에는 도로 및 철도를 위한 대단면 터널의 시공까지 그 적용범위가 커지고 있다. 그러나 터널설계 시 TBM의 적용기술은 외국의 의존성이 매우 크며, 국내 지질특성 및 기술의 반영이 다소 미흡한 실정이다.

TBM의 시공능력은 주로 암석의 강도, 절리면, 균열 및 응력상태 등과 같은 지반조건과 기계성능에 대한 조건에 의존한다. 따라서 TBM 시공을 이용한 터널설계를 위해서는 커터(Cutter) 관입에 의해 기인하는 암석의 칩핑(Chipping) 메커니즘에 대한 이해가 필요하며, 관입율(Penetration rate), 굴진율(Advance rate) 및 가동율(Utilization) 등에 의한 TBM 시공능력의 평가가 수행되어야 한다. 특히 관입속도의 예측·평가는 전반적인 터널설계 및 시공에 있어서 필수적이다. 그러나 암석의 복잡한 구성상태로 인하여 굴착 과정 예측의 정확한 평가가 어려우며, 실제 현장에서 굴착에 미치는 영향인자에 대한 정확한 규명이 이루어지지 못하고 있는 것이 사실이다. 이와 같은 문제점을 해결하고자 TBM을 이용한 터널의 설계와 평가를 위하여, 커터(Cutter) 성능에 관점을 두고 있는 이론적 모델과 TBM 굴착에 관한 전체적인 성능에 관점을 둔 경험적 모델 등의 다양한 굴진성능 예측모델이 개발되어 왔다.

따라서 본 연구에서는 현장사례를 이용하여 TBM의 굴착성능에 대한 경험적 모델을 평가하고자, 터널시공 현장 내의 26개소에서 채취한 시추코어의 강도정수 평가결과를 바탕으로 다양한 경험적 예측모델에 적용함으로써 관입속도를 예측하였다. 또한 국내 현장에 보다 합리적인 예측모델의 적용을 위하여, 예측결과를 시공 시 실제 나타난 결과와 비교·분석하였다.

2. TBM 관입속도 예측모델

TBM의 관입속도를 예측하기 위한 대부분의 모델은 관입율의 예측에 기인하며, 전반적인 굴착성능과 관련해서

는 암석 강도 및 지질조건 등에 대한 정밀한 평가가 이루어져야 한다(박철환 등, 1993; 조만섭 등, 2003). 따라서 본 절에서는 암석의 공학적 특성 및 TBM의 기계적 특성을 이용하여 관입속도를 예측할 수 있는 모델들에 대하여 기술하였다.

2.1 일축압축강도를 이용한 예측모델

Graham(1976)은 미국 로빈스(Robbins)사의 현장경험을 바탕으로 식 (1)에 나타낸 바와 같이 암석의 일축압축강도로부터 순관입율을 산정할 수 있는 경험식을 제시하였다. 이는 암석의 일축압축강도와 RPM(revolution per minute), 커터 당 추력의 함수로 관입율을 산출하는 모델로서, TBM의 순관입율에 영향을 주는 요소를 암석의 일축압축강도와 추력으로 판단하였으며, 일반적으로 일축압축강도가 140MPa~200MPa의 경암에서 시공한 사례들을 대상으로 제안한 것이다.

$$i_o = (3940 \times F_n) / \sigma_{cf} \quad (1)$$

여기서, i_o : 순관입율(mm/rev)

F_n : 커터 당 추력(kN)

Hughes(1986)는 식 (2)에서 보는 바와 같이 커터 당 추력, 일축압축강도 및 커터 직경의 관계를 이용하여 순관입율을 산정할 수 있는 모델을 제시하였다.

$$i_o = 1.667 \left(\frac{F_n}{\sigma_{cf}} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{2}{D} \right)^{0.6} \quad (2)$$

여기서, D : 커터 직경 (m)

Tarkoy(1986)는 일축압축강도와 TBM 관입율과의 관계에 대하여 식 (3)과 같은 모델을 제시한 바 있다.

$$P_r = -0.909 \ln(\sigma_{cf}) + 7.2349 \quad (3)$$

여기서, P_r : 관입율 (m/hr)

σ_{cf} : 일축압축강도 (MPa)

2.2 NTNU(Norwegian University of Science and Technology) 모델

NTNU 모델은 노르웨이 과학기술대학에서 개발된 방법으로서, 수십 년간 축적된 현장자료 및 시험자료에 근거하여 개발된 경험적인 TBM 설계 및 성능평가 모델이다 (Bruland, 1998a). 이에 박철환 등(2000)은 NTNU 모델을 극경암에서의 관입속도 설계에 가장 적절한 설계방법으로 평가한 바 있다. 즉, DRI(Drilling rate index) 및 CLI (Cutter life index)와 같은 암석 특성, 지질 특성 및 TBM 장비의 제원을 바탕으로 TBM 설계가 가능하도록 하였다.

먼저, DRI는 암석의 천공저항시험(Siever's miniature drill test) 및 취성도시험(Brittleness test)에 의한 결과로부터 산정할 수 있다. 즉, 그림 1에서 보는 바와 같이, DRI는 취성도(S_{20})와 천공저항지수(SJ)의 관계도표를 이용하여 산정할 수 있다. 그리고 CLI는 천공저항지수와 TBM 디스크커터의 커터마모지수(Abrasion value Steel, AVS)를 이용하여 디스크커터의 마모수명을 예측하는 지수로서, 산정식은 식 (4)와 같다. 또한 그림 2(a)에서 보는 바와 같이, 암반의 균열계수(k_s) 및 천공속도계수(K_{DRI})를 산정하여 등가균열계수(k_{ekv})를 도출할 수 있으며, 그림 2(b)와 같이 등가추력(M_B)에 따라 등가균열계수에 대한 관입깊이를 예측할 수 있다. 이 때, 등가추력(M_B), 커터의 직경 보정계수(k_d) 및 간격 보정계수(k_a)를 이용한 추력 보정계수(M_{ekv})

를 적용하게 된다. 이와 같이 NTNU 모델을 이용한 TBM 관입속도 예측 및 성능평가 방법은 Bruland(1998a, 1998b, 1998c, 1998d)에 의해 자세히 정리되었다.

$$CLI = 13.84 \times \left(\frac{SJ}{AVS} \right)^{0.3847} \quad (4)$$

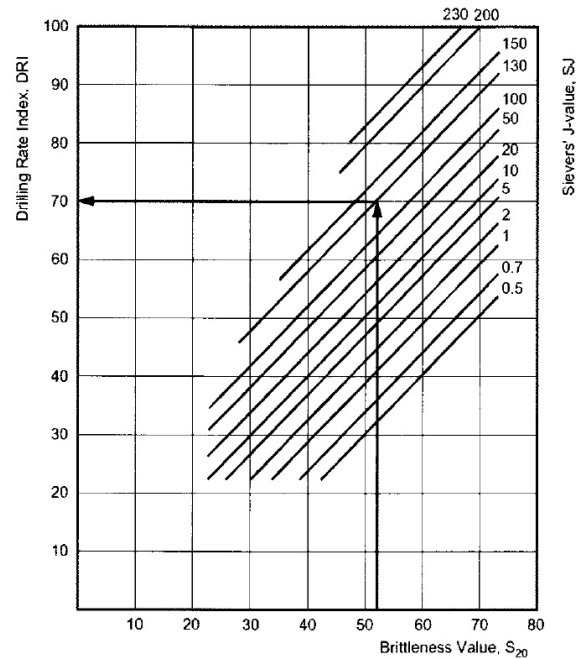
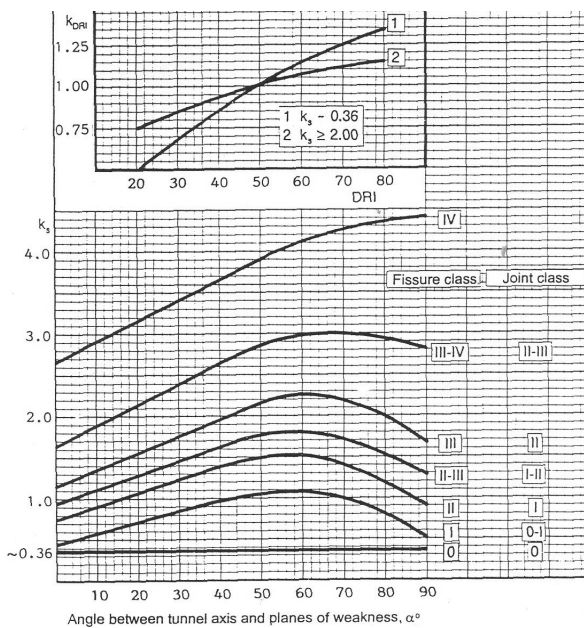
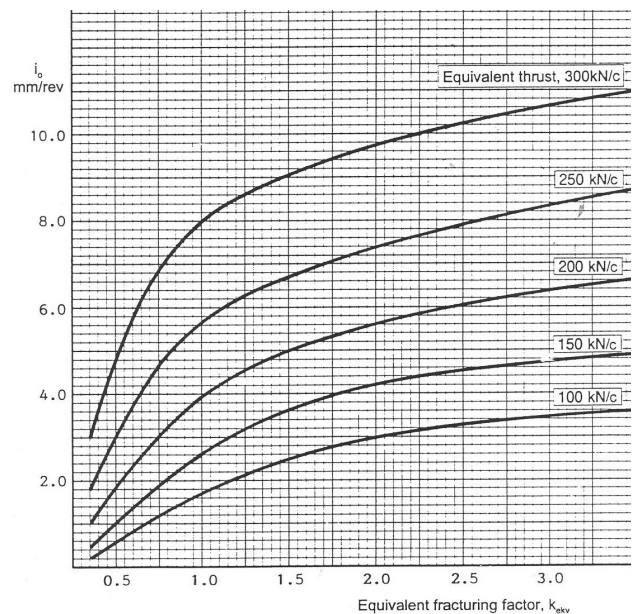


그림 1. 취성도와 천공저항지수 관계를 이용한 DRI 산정 도표 예 (Bruland, 1998c)



(a) 암반의 균열계수 및 천공속도계수 산정



(b) 등가균열계수를 이용한 관입깊이 산정

그림 2. 관입깊이 산정 도표 예(Bruland, 1998b)

3. 사례현장의 지반공학적 특성

3.1 현장개요

본 연구에서는 OO-OO 지중전력관로 시공 구간으로서, 도심지 지하구조물 시공의 일부로 수행된 현장을 적용하였다. 터널은 지하 40~50m에 위치하고 길이가 약 4.9km이며, 굴착방법은 직경 4.5m의 Open TBM으로 설계되었다. 관입속도의 예측을 위한 경험적 모델을 비교·분석하기 위하여, 전체 터널구간 중 26개소를 선정하여 암석의 강도 특성을 분석하였으며, 이를 RMR 타입에 따라 표 1과 같이 분류하였다. 또한 TBM 시공구간의 위치에 따른 RMR 및 RQD의 분포는 그림 3에서 보는 바와 같다.

3.2 지질 및 지반공학적 특성

본 사례현장의 지질은 편마암류와 소규모의 규암 및 석회암이 기반암으로 분포하고 있으며, 퇴적층이 기반암을 피복하고 있다. 지질구성 상태 중에 대부분을 차지하고 있

는 편마암의 경우에는 변성과정에서 광물이 재배열되어 편리를 형성한 것으로 확인되었다. 따라서 편마암의 편리구조가 시공에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 표 2에 나타난 바와 같이 편마암의 풍화도에 따른 일축압축강도를 분석하였다. 신선 또는 약간 풍화된 상태의 경우, 일축압축강도의 평균값은 각각 120.5MPa 및 107.0MPa이며, 이에 대한 강도의 표준편차는 56MPa와 70MPa로서, 이는 평균값의 약 47%~65%에 해당하는 수치이다. 이와 같이 불규칙적인 강도특성을 나타낸 원인은 편리구조가 강도에 영향을 미쳤기 때문인 것으로 분석되었다.

한편, 사례현장의 시공구간은 A하천 및 B하천에 평행

표 2. 편마암의 풍화도에 따른 일축압축강도 특성(단위: MPa)

풍화도	강도 범위	강도 평균	강도 표준편차
신선(Fresh, F)	28~213	120.5	56
약간 풍화 (Slightly Weathered, SW)	34~180	107.0	70
보통 풍화 (Moderately Weathered, MW)	22	22.0	0

표 1. 암석의 RMR 타입에 따른 강도 특성

RMR	암석의 종류	암석시료 No.	일축압축강도(MPa)	RQD(%)
Type-1	극경암	BH-19	220	90
Type-2	경암	BH-2, 3, 5, 6, 11, 13, 17, 21, 25	100~200	43~89
Type-3	보통암	BH-1, 4, 7, 9, 14, 16, 18	90~100	22~75
Type-4	연암	BH-8, 10, 15, 20, 22, 26	25~90	8~53
Type-5	풍화암	BH-12, 23, 24	5~12	0~4

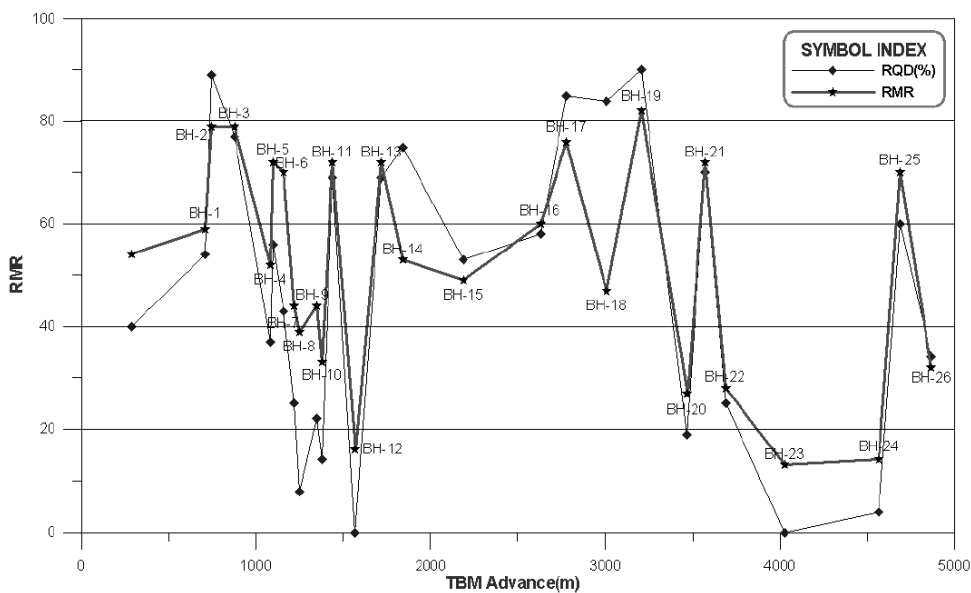


그림 3. 시공구간의 위치에 따른 RMR 및 RQD 분포

하거나 횡단하고 있기 때문에, 하천이 지질구조에 미치는 영향을 확인하였다. A하천은 그 규모로 보아 단층운동으로 인하여 형성된 것으로 추정되었으며, 지층상태는 기복이 심한 상태인 것으로 나타났다. 특히, 시공구간 중에 A하천과 B하천이 만나는 지점의 지질상태가 가장 불규칙적인 것으로 나타났다. 즉, 이와 같은 불규칙적인 지질구성상태가 일부 시공구간의 강도에 영향을 미친 것으로 분석되었다.

4. 경험적 예측모델의 적용 및 고찰

TBM 관입속도를 예측하기 위한 대부분의 경험적 모델들은 순관입율(mm/rev) 및 관입율(m/hr)의 예측과 관련이 있는 것으로 확인되었다. 이 때, 순관입율은 TBM의 평균 RPM을 고려하여 시간당 굴진거리인 관입율로 표현할 수 있다. 따라서 본 절에서는 경험적 모델들을 이용한 관입속도 예측을 위하여 설계에 필요한 변수들을 적용한 후, 예측결과를 분석하였다. 또한 실제 사례현장의 실측치와 비교를 통하여 보다 합리적인 예측모델에 대하여 분석하였다.

4.1 관입속도 예측

암석의 일축압축강도 및 TBM 기계적 성질을 바탕으로 경험적 모델을 이용한 TBM의 관입속도를 예측하였다. 이 때, 사례현장에 적용된 TBM의 제원은 직경 4.5m, 커터 직경 0.432m 및 커터 당 최대 추력이 220kN이다.

4.1.1 일축압축강도를 이용한 예측 결과

Graham(1976)이 제안한 모델을 바탕으로 시공구간의

26개소에서 채취한 암석의 일축압축강도 및 TBM의 커터 당 추력을 이용하여 순관입율 및 관입율을 산정한 결과를 표 3 및 그림 4에 나타내었다. 표 3에서 보는 바와 같이, 시험구간 BH-10, 12, 20, 22, 23, 24, 26에서의 순관입율 및 관입율은 각각 28.89mm/rev~173.36mm/rev과 18.72m/hr~112.34m/hr인 것으로 나타났다. 이는 일축압축강도가 5MPa~50MPa인 약선대 구간으로서, 타 구간 및 평균보다 매우 높은 결과이다. 그러나 약선대는 시공 중에 붕락발생으로 인한 보강작업 등의 시공지연에 기인하여 관입속도가 현저히 저하될 수 있기 때문에, 실제 현장에서는 발생할 수 없는 속도라 할 수 있다. 따라서 Graham(1976)이 제안한 예측방법은 전술한 바와 같이, 일축압축강도가 140MPa~200MPa일 경우에 합리적인 예측이 가능한 것으로 분석되었다.

Hughes(1986)가 제안한 모델을 이용하여 순관입율 및 관입율을 산정한 결과는 표 4 및 그림 5에서 보는 바와 같다. 시험구간 BH-10, 12, 20, 22, 23, 24, 26에서의 순관입율 및 관입율은 각각 8.77mm/rev~27.73mm/rev과 5.68m/hr~17.97m/hr인 것으로 확인되었다. 이는 일축압축강도의 범위가 5MPa~50MPa에 해당하는 시험구간의 결과이지만, Graham(1976)이 제안한 모델을 적용한 결과와 유사한 경향을 나타내었다. 그러나 커터 직경이 고려되었기 때문에, 각각의 시험구간에 대한 관입속도는 Graham(1976)의 모델에 비하여 최대 약 85%가 감소하였다.

Tarkoy(1986)가 제안한 식 (3)을 이용하여 사례현장의 시공구간에 따른 관입속도를 산정하였으며, 그 결과는 표 5 및 그림 6에서 보는 바와 같다. 각 시험구간에 따른 관입속도의 전체적인 경향은 앞서 산정한 두 모델과 유사한 것

표 3. Graham(1976)이 제안한 모델을 이용한 시험구간에 따른 관입속도 산정 결과

구 분	BH-1	BH-2	BH-3	BH-4	BH-5	BH-6	BH-7	BH-8	BH-9
평균 σ_{cf} (MPa)	100	200	200	90	150	200	90	90	100
i_o (mm/rev)	8.67	4.33	4.33	9.63	5.78	4.33	9.63	9.63	8.67
P_r (m/hr)	5.62	2.81	2.81	6.24	3.74	2.81	6.24	6.24	5.62
구 분	BH-10	BH-11	BH-12	BH-13	BH-14	BH-15	BH-16	BH-17	BH-18
평균 σ_{cf} (MPa)	50	120	10	100	90	90	90	120	90
i_o (mm/rev)	17.34	7.22	86.68	8.67	9.63	9.63	9.63	7.22	9.63
P_r (m/hr)	11.23	4.68	56.17	5.62	6.24	6.24	6.24	4.68	6.24
구 분	BH-19	BH-20	BH-21	BH-22	BH-23	BH-24	BH-25	BH-26	평균
평균 σ_{cf} (MPa)	220	30	100	25	5	12	90	25	-
i_o (mm/rev)	3.94	28.89	8.67	34.67	173.36	72.23	9.63	34.67	22.95
P_r (m/hr)	2.25	18.72	5.62	22.47	112.34	46.81	6.24	22.47	14.87

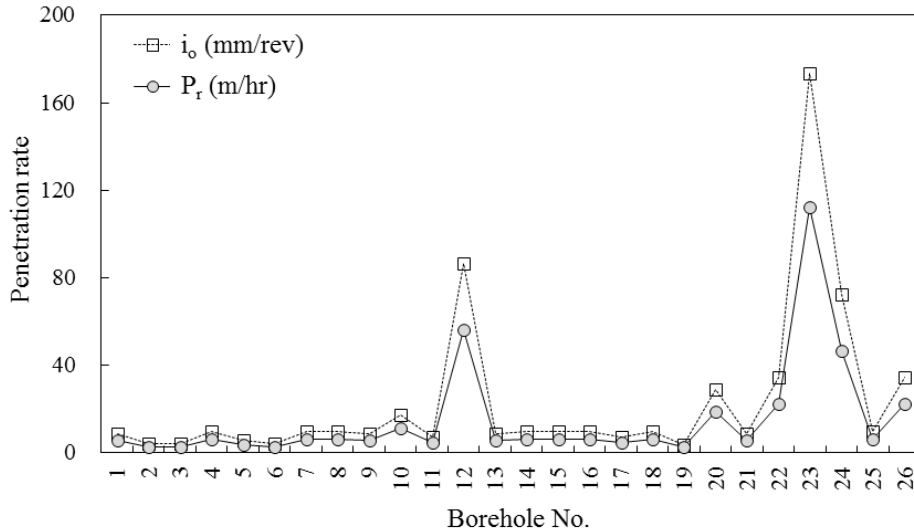


그림 4. 시공구간에 따른 관입속도 예측 결과(by Graham, 1976)

표 4. Hughes(1986)이 제안한 모델을 이용한 시험구간에 따른 관입속도 산정 결과

구 분	BH-1	BH-2	BH-3	BH-4	BH-5	BH-6	BH-7	BH-8	BH-9
평균 σ_{cf} (MPa)	100	200	200	90	150	200	90	90	100
i_o (mm/rev)	6.20	4.38	4.38	6.54	5.06	4.38	6.54	6.54	6.20
P_r (m/hr)	4.02	2.84	2.84	4.24	3.28	2.84	4.24	4.24	4.02
구 분	BH-10	BH-11	BH-12	BH-13	BH-14	BH-15	BH-16	BH-17	BH-18
평균 σ_{cf} (MPa)	50	120	10	100	90	90	90	120	90
i_o (mm/rev)	8.77	5.66	19.61	6.20	6.54	6.54	6.54	5.66	6.54
P_r (m/hr)	5.68	3.67	12.71	4.02	4.02	4.24	4.24	3.67	4.24
구 분	BH-19	BH-20	BH-21	BH-22	BH-23	BH-24	BH-25	BH-26	평균
평균 σ_{cf} (MPa)	220	30	100	25	5	12	90	25	-
i_o (mm/rev)	4.18	11.32	6.20	12.40	27.73	17.90	6.54	12.40	8.50
P_r (m/hr)	2.71	7.34	4.02	8.04	17.97	11.60	4.24	8.04	5.51

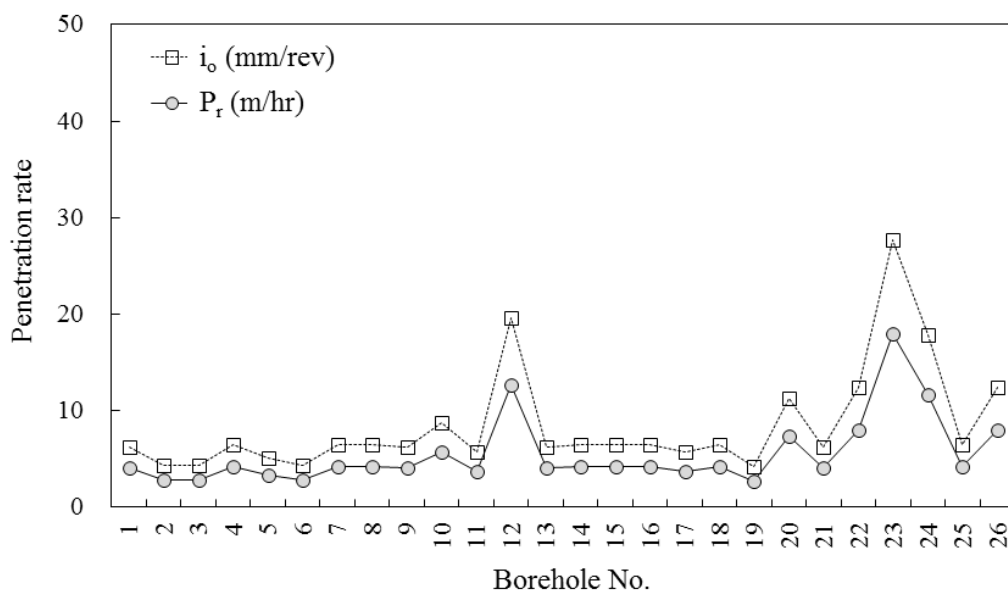


그림 5. 시공구간에 따른 관입속도 예측 결과(by Hughes, 1986)

표 5. Tarkoy(1986)이 제안한 모델을 이용한 시험구간에 따른 관입속도 산정 결과

구 분	BH-1	BH-2	BH-3	BH-4	BH-5	BH-6	BH-7	BH-8	BH-9
평균 σ_{cf} (MPa)	100	200	200	90	150	200	90	90	100
i_o (mm/rev)	4.71	3.73	3.73	4.85	4.14	3.73	4.85	4.85	4.71
P_r (m/hr)	3.05	2.42	2.42	3.15	2.68	2.42	3.15	3.15	3.05
구 분	BH-10	BH-11	BH-12	BH-13	BH-14	BH-15	BH-16	BH-17	BH-18
평균 σ_{cf} (MPa)	50	120	10	100	90	90	90	120	90
i_o (mm/rev)	5.68	4.45	7.94	4.71	4.85	4.85	4.85	4.45	4.85
P_r (m/hr)	3.68	2.88	5.14	3.05	3.15	3.15	3.15	2.88	3.15
구 분	BH-19	BH-20	BH-21	BH-22	BH-23	BH-24	BH-25	BH-26	평균
평균 σ_{cf} (MPa)	220	30	100	25	5	12	90	25	-
i_o (mm/rev)	3.60	6.39	4.71	6.65	8.91	7.68	4.85	6.65	5.21
P_r (m/hr)	2.33	4.14	3.05	4.31	5.77	4.98	3.15	4.31	3.37

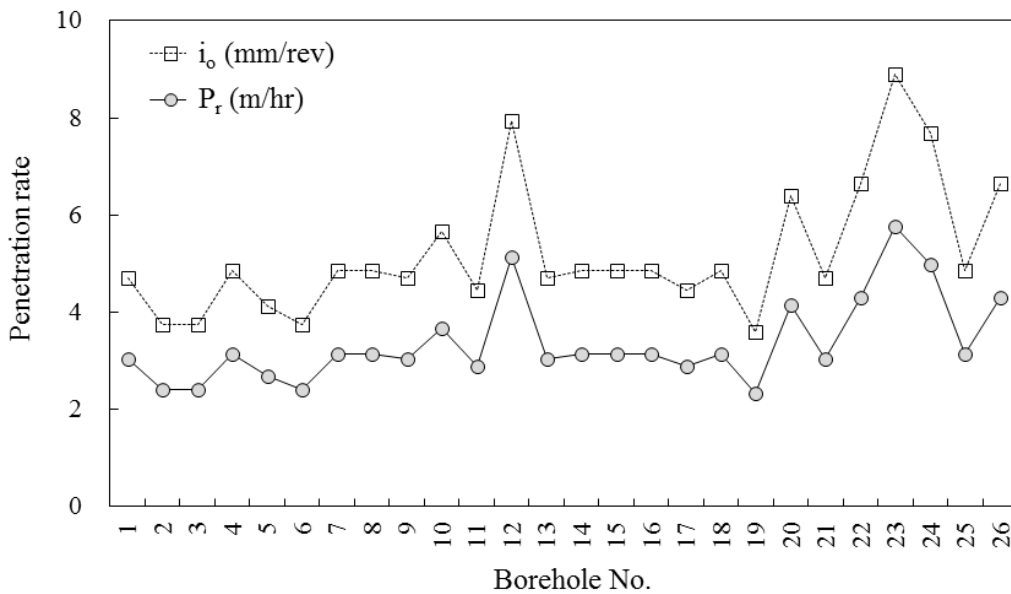


그림 6. 시공구간에 따른 관입속도 예측 결과(by Tarkoy, 1986)

으로 확인되었지만, 순관입율 및 관입율의 평균은 감소한 것으로 나타났다.

관입율의 오차가 큰 것으로 나타났다.

4.1.2 NTNU 모델을 이용한 예측 결과

Bruland(1998a, 1998b, 1998c, 1998d)가 정리한 NTNU 모델의 평가방법을 바탕으로 암반의 물리적 특성 및 TBM의 기계적 성질을 이용하여 표 6 및 그림 7과 같이 시공구간에 따른 관입속도를 예측하였다. 이 때, 일축압축강도에 의한 예측결과를 고려하여 오차가 심한 시험구간은 제외하였다. 순관입율은 구간에 따라 1.8mm/rev~5.7mm/rev로 산정되었으며, 이를 이용하여 산정한 관입율은 평균 2.15m/hr의 속도를 갖는 것으로 확인되었다. 또한 시험구간 BH-18, 20, 21의 경우에는 다른 구간에 비하여 평균

4.2 예측결과 고찰

각각의 예측결과를 비교하기 위하여 순관입율과 관입율에 대한 최대값과 최소값을 비교하였으며, 그림 8에서 보는 바와 같다. Graham이 제안한 모델을 적용한 결과의 경우, 다른 모델들에 비하여 최대값과 최소값이 편차가 매우 크게 나타났으며, 이는 본 사례현장의 일축압축강도가 낮게 나타난 구간의 영향에 따른 것으로 분석되었다. 즉, 전술한 바와 같이 풍화암 또는 연암에 적용하기에는 무리가 있는 것으로 판단된다. Hughes가 제안 모델의 경우에는 디스크 커터의 직경이 고려되어 Graham의 모델에 비

표 6. NTNU 모델을 이용한 시험구간에 따른 관입속도 산정 결과

시료 No.	절리간격 (cm)	절리등급	절리경사 (°)	k_s	K_{DRI}	k_{ekv}	k_a	k_d	M_B (kN/c)	M_{ekv} (kN/c)	i_o (mm/rev)	P_r (m/hr)
BH-1	12	II ~ III	52	2.80	0.97	2.72	0.93	1.15	110.3	118	3.50	2.27
BH-3	50	I	44	1.50	0.97	1.46	0.93	1.15	95.6	102	2.50	1.62
BH-7	15	II ~ III	50	2.85	0.97	2.76	0.93	1.15	95.6	102	3.75	2.43
BH-8	9	II ~ III	50	2.85	0.97	2.76	0.93	1.15	66.2	71	2.40	1.56
BH-11	30	II ~ III	54	2.92	0.97	2.83	0.93	1.15	103	110	3.60	2.33
BH-15	15	II ~ III	35	2.55	0.97	2.47	0.93	1.15	66.2	71	2.40	1.56
BH-17	60	I	48	1.50	0.97	1.46	0.93	1.15	110.3	118	2.80	1.81
BH-18	20	II ~ III	50	2.85	0.97	2.76	0.93	1.15	139.7	149	4.50	2.92
BH-20	8	II ~ III	46	2.75	0.97	2.67	0.93	1.15	36.8	39	1.80	1.17
BH-21	40	I	45	2.72	0.97	2.64	0.93	1.15	176.5	189	5.70	3.69
BH-22	5	II ~ III	45	2.72	0.97	2.64	0.93	1.15	95.6	102	3.20	2.07
BH-24	5	II ~ III	62	3.00	0.97	2.91	0.93	1.15	103	110	3.50	2.27
BH-26	20	II ~ III	67	3.00	0.97	2.91	0.93	1.15	110.3	118	3.80	2.27
평균	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.34	2.15

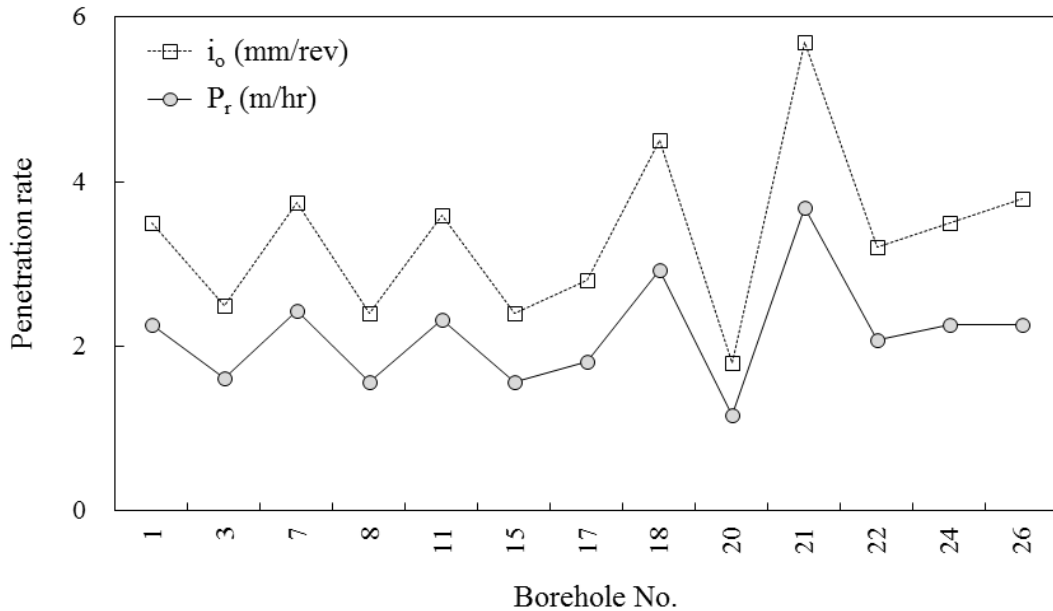


그림 7. 시공구간에 따른 관입속도 예측 결과(by NTNU)

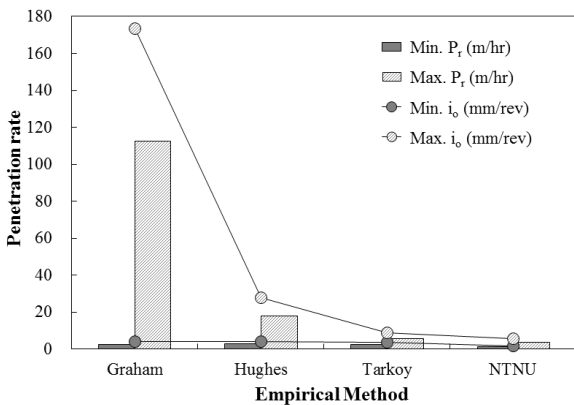


그림 8. 경험적 모델에 의한 관입속도 예측 결과

해서는 편차가 크게 감소하였지만, Hughes의 모델도 낮은 일축압축강도의 암석에 적용하는 것은 예측결과의 신뢰성을 저하시키는 것으로 분석되었다. 그러나 Tarkoy 모델의 경우에는 낮은 강도의 구간에서 다소 차이가 나타나긴 했지만, 평균 관입율에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다. 특히, 암석의 다양한 특성 및 TBM의 기계적 성질을 반영한 NTNU 모델은 최대값 및 최소값의 편차가 가장 낮게 나타났으며, 이는 신뢰성이 가장 높은 것으로 나타났다.

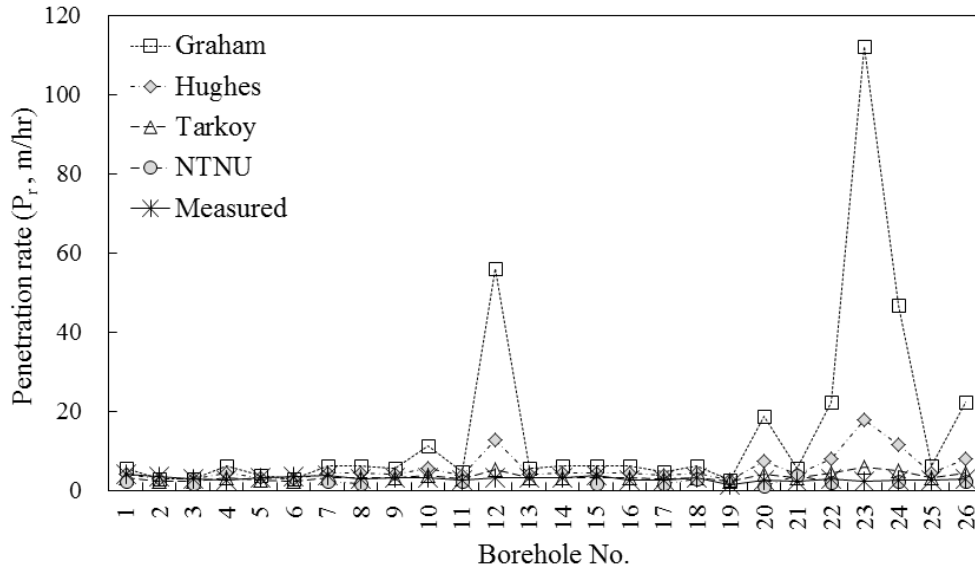


그림 9. 시공구간에 따른 관입속도 예측결과와 실측치 비교

4.3 관입속도 예측결과와 현장 실측치 비교·분석

시공구간에 따른 관입속도의 예측결과와 실제 시공 시의 관입속도를 비교하기 위하여 관입율에 대하여 그림 9와 같이 나타내었다. 대부분의 구간에서 실측치와 유사하게 나타나지만, 일축압축강도를 주요변수로 적용하는 모델 중 Graham 및 Hughes의 모델에서는 강도가 낮은 약선대 구간인 BH-10, 12, 20, 22, 23, 24, 26에서 그 차이가 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 경험적 모델의 예측결과와 같이, 약선대 구간에서는 보강작업 등에 의한 시공지연에 기인하여 관입속도가 저하된다는 분석결과의 당위성을 증명하는 것이다. 즉, 예측대상 암석의 특성을 합리적으로 고려하지 못하고, 예측모델을 일률적으로 적용하는 것은 설계 및 시공에 있어서 큰 오차를 발생시킬 수 있음을 의미한다.

한편, 실측치에 의한 평균 관입율은 2.89인 것으로 확인되었으며, 오차가 크게 발생한 Graham 및 Hughes의 모델을 제외한 나머지 모델들에 대해서 실측치와 대비하여 오차율을 산정하였다. Tarkoy 및 NTNU 모델의 평균 관입율의 오차는 각각 14.2% 및 34.4%인 것으로 분석되었으며, 실측치와 가장 근접한 예측모델로는 Tarkoy가 제안한 모델인 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 현장사례를 이용하여 TBM의 굴착성능

에 대한 경험적 모델을 평가하고자, 현장사례를 이용하여 다양한 경험적 예측모델을 적용함으로써 관입속도를 예측하였으며, 이를 실측치와 비교·분석하였다. 이에 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) Graham 및 Hughes가 제안한 모델을 적용한 예측결과, 암석의 일축압축강도가 낮은 구간에서는 평균 관입율에 비하여 편차가 매우 크게 나타났다. 특히, Graham의 모델에 있어서 일축압축강도가 50MPa 이하일 경우에는 관입속도의 예측이 비현실적인 것으로 확인되었다.
- (2) Tarkoy의 모델을 적용한 예측결과는 낮은 일축압축강도의 구간에서 편차가 다소 나타났지만, 평균 관입율에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었으며, NTNU 모델의 예측결과가 평균 관입율에 있어서 가장 신뢰성이 높은 것으로 확인되었다. 이는 다양한 암석의 특성 및 TBM의 기계적 성질을 합리적으로 반영하였기 때문으로 분석되었다.
- (3) 실측된 결과와 비교하여 Tarkoy 및 NTNU 모델의 예측결과를 이용한 평균 관입율의 오차는 각각 14.2% 및 34.4%이었다. 이는 본 현장사례의 경우, 신뢰성이 가장 높게 나타났던 NTNU 모델이 아닌 Tarkoy가 제안한 예측모델이 실측치와 가장 근접한 것을 의미한다. 즉, 본 연구구간의 암종은 편마암이며, 지질특성으로 인하여 절리 및 엽리의 발달에 의한 약선대의 존재가 예측결과에 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

따라서 TBM의 관입속도 예측 시에는 대상 암종, 지질 특성 및 TBM의 장비 특성을 모두 고려하여 다양한 모델을 이용한 예측을 수행해야 하며, 이를 바탕으로 합리적인 방법을 선택·적용해야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 박철환, 신중호, 박찬, 김민규, 정소걸, 김화수 (2000), “극경암에서의 전단면터널 굴착속도 분석연구”, *한국암반공학회지*, 제10권, 제4호, pp.526-532.
2. 박철환, 신희순, 정소걸, 이경운, 이문식, 오정일 (1993), “굴착능력과 굴착속도분석에 의한 TBM공법의 평가”, *한국자원공학회지*, 제30권, pp.29-39.
3. 조만섭, 우동찬, 김경권, 이진무 (2003), “국내 TBM 굴진속도 산정을 위한 경험적 방법들의 적용성 분석”, *한국암반공학회지*, 제13권, 제4호, pp.260-269.
4. Bruland, A. (1998a), *Hard rock tunnel boring : Background and discussion*, Vol.1, Doctoral Theses at NTNU 1998:81.
5. Bruland, A. (1998b), *Hard rock tunnel boring : Advance rate and cutter wear*, Vol.3, Doctoral Theses at NTNU 1998:81.
6. Bruland, A. (1998c), *Hard rock tunnel boring : Drillability test methods*, Vol.8, Doctoral Theses at NTNU 1998:81.
7. Bruland, A. (1998d), *Hard rock tunnel boring : Drillability catalog of drillability indices*, Vol.9, Doctoral Theses at NTNU 1998:81.
8. Friant, J. E. and Ozdemir, L. (1993), “Tunnel boring technology-present and future”, *Proc. of Rapid Excavation and Tunneling Conference(RETTC)*, pp.869-888.
9. Graham, P. C. (1976), “Rock exploration for machine manufacturers”, *Proc. of Symposium on Exploration for Rock Engineering*, Johannesburg, Balkema, Rotterdam, pp.173-180.
10. Hughes H. M. (1986), “The relative cuttability of coal-measures stone”, *Mining Science and Technology*, Vol.3, No.2, pp.95-109.
11. Tarkoy, P. J. (1986), *Practical Geotechnical and Engineering Properties for Tunnel-Boring Machine Performance Analysis and Prediction*, Transportation Research Record 1087, Durability, Strength, and Analysis of Culverts and Tunneling machines. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. pp.62-78.

(논문접수일 2011. 11. 20, 심사완료일 2011. 12. 17)