터널과 지하공간, 한국암반공학회지
제13권 제4호, 2003년 8월, pp. 260~269

TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, Vol. 13, No. 4, 2003, pp. 260-269
Journal of Korean Society for Rock Mechanics

국내 TBM 굴진속도 산정을 위한 경험적 방법들의 적용성 분석

조만섭[1]*, 우동찬[2], 김경곤[3], 이진무[4]

Applicability Analysis of Empirical Methods for the Calculation of TBM Advance Rate

Man-Sup Cho, Dong-Chan Woo, Kyung-Kon Kim and Jin-Moo Lee

Abstract In order to introduce to engineers the suitable calculation techniques of TBM advance rate (Ad.) and ultimately promote to understand the designing process, this study was carried out. We analyzed the 17 bored data of TBM which applied to the roadway and water supply tunnels in Korea. From this analysis, it was able to know that the average utilization is 30.83% and the correlation equation of Ad and TBM's diameter (D) is $Ad(m/month) = 506.05 \cdot e^{-0.1162 \times D}$ then the correlation coefficient (R^2) is 0.76. In the object of the W tunnel of Seoul-Busan highspeed railway, the Ad of TBM 5.0mØ was analyzed by the variety of empirical models and upper correlation equation. Average Ad of the empirical models was calculated to be larger than one of the upper equations. But considering only the results of 3.0~5.0mØ TBM in the 17 bored data, the average Ad by the models belongs to the similar range of bored data. Therefore, when the reliability and representative of parameters are decreased, a reliability test should be carried out through the comparison a variety of empirical models with the upper correlation equation.

KeyWords: TBM, Penetration Rate, Utilization, Advance Rate, Empirical Prediction Models

초 록 본 연구는 TBM의 설계에 대한 기술자들의 이해를 넓히고, 적절한 TBM 굴진속도의 산정기법들을 제시하기 위한 목적으로 수행하였다. 국내의 도로터널 및 수로터널 등에 적용된 18개 TBM굴착 자료를 분석한 결과, 평균 가동율은 30.83%이며, TBM 직경과 월 평균 굴진율과의 상관식은 $Ad(m/month) = 506.05 \cdot e^{-0.1162 \times D}$으로 이때 상관계수($R^2$)는 0.76이다. 경부고속철도 W터널을 대상으로 TBM(5.0mØ)의 설계 굴진속도를 상기 식과 여러 모델들로부터 구한 결과, 월 평균 굴진율은 NTS 및 경험적 모델들이 위의 상관식에 의한 결과보다 크게 산정되었다. 그러나 17개의 국내자료 분석 결과로부터 TBM 직경이 3.0~5.0mØ인 자료들만을 고려하면 유사한 범위에 속함을 알 수 있었다. 따라서 조사자료의 신뢰성 및 대표성이 저하되는 경우, 경험적 모델들에 의한 굴진속도와 국내 시공사례를 이용한 상관식 등을 비교하여 신뢰성을 확보해야 할 것이다.

핵심어: TBM, 순관입율, 가동율, 굴진율, 경험적 예측 모델

1. 서 론

국내의 터널 기계화 굴착은 TBM도입부터 현재까지 20년 이상의 Knowhow를 가지고 있으며, 소단면 산악터널에서 대단면 도심지터널로 적용대상을 점차 넓혀가고 있다. 또한 Open TBM뿐만 아니라 Hybrid Shielded TBM, RBM, Roadheader, Microtunnelling 등 지반조건, 터널 규모 및 기능 등에 적합한 기계화 굴착이 적용되어 왔고, 많은 양적 그리고 질적인 향상을 이룩하였다. 그러나 기계화의 설계분야에 대한 기술은 유럽 국가 및 일본 등에 의존하는 경향이 크며, 연구분야에서도 국내 지질 및 기술특성의 반영이 다소 미흡한 수준이다.

따라서 본 연구에서는 TBM의 설계분야에 대한 기술자들의 이해를 넓히고, 설계단계에서의 한정된 조사 자료를 이용하여 굴진속도를 예측하는 경우에 적용상의 오류 등을 최소화할 수 있도록 다음과 같은 연구를 수

[1]정회원, (주)유니벡 토목사업본부 터널팀 차장
[2]정회원, (주)유니벡 토목사업본부 터널팀장 이사
[3]정회원, (주)유니벡 사장
[3]정회원, (주)SK건설 토목T/K팀 부장
*교신저자(Corresponding Author): mscho66@cricmail.net
접수일: 2003년 3월 24일
심사 완료일: 2003년 7월 21일

행하였다. 먼저, 문헌조사를 통해 TBM의 굴진속도를 예측하기 위한 모델들의 매개변수, 상관식 및 적용범위 등을 제시하였고, 국내의 도로터널 및 수로터널 등에 적용된 18개 TBM굴착 자료를 수집하여 가동율 및 직경별 월 평균 굴진율을 분석하였다.

이와 더불어 경부고속철도 W터널(L=8,830 m)을 대상으로 Norwegian Tunnelling Society(1998)에서 제시한 모델과 여러 모델들을 대상으로 TBM 관입율을 분석하였고, 위에서 언급한 국내의 TBM 시공사례 분석결과를 이용하여 TBM 굴진율의 예측과 타당성을 검토해 보았다.

2. TBM 굴진속도 예측모델

TBM 굴진속도를 예상하기 위한 대부분의 모델들은 관입율(mm/rev 혹은 m/hour)의 예측과 관련이 있는데, 기존에 제시된 모델들의 조사를 통해 설계에 필요한 매개변수들을 파악하고, 그 모델들의 특성을 분석하는 것이 필요하다. 참고로 연구자들에 따라 관입율의 표현방식에는 차이가 있는데, 1회전의 커터헤드 가동 시 암반에 관입되는 깊이를 나타내는 방법(mm/rev)과 TBM의 평균 RPM을 고려한 시간당 굴진거리(m/hour)로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 전자를 순관입율(Net penetration rate, i_o), 후자를 관입율(Penetration rate, Pe)로 표기하였다.

U.S. Army Corps(1997), Norwegian Tunnelling Society (1998), Grima 외(2000) 등은 여러 예측 모델들을 대상으로 TBM의 굴진속도와 매개변수와의 관계를 분석하였는데, 그 결과들을 간략하게 소개하면 다음과 같다.

- Tarkoy(1973)는 일축압축강도와 TBM 관입율과의 관계와 함께 반발경도와 마모경도를 변수로 사용한 합경도(Total hardness, H_T)와의 관계를 제안하였다. 이 모델들은 암반의 절리특성뿐만 아니라 장비특성이 고려되지 못한 단점을 가지고 있다.
- Graham(1976)은 암석의 일축압축강도와 RPM, 커터 당 추력의 함수로 관입율을 산출하는 모델을 제

Table 1. A variety of empirical models to calculate the penetration rate.

Parameter	Proposer	Year	Correlation	Note
Unconfined compressive strength	Graham	1976	$i_o = (3940 \times F_n) / \sigma_{cf}$	$140 < \sigma_{cf} < 200$MPa
	Hughes	1986	$i_o = 1.667\left(\frac{F_n}{\sigma_{cf}}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{2}{D}\right)^{0.6}$	
	Tarkoy	1985	$Pe = -0.909\ln(\sigma_{cf}) + 7.2349$	
	Yuwon Construction Co.	-	σ_{cf} (kgf/cm^2): 1,500over / 1,300~1,500 / 1,000~1,300 / 700~1,000 / 500~700 i_o(mm/rev): 2.3~2.7 / 2.7~3.2 / 3.2~3.8 / 3.8~4.2 / 4.2~4.7	
Tensile strength	Farmer & Glossop	1980	$i_o = (624F_n) / \sigma_{rf}$	Prefer to soft rock
Rebound hardness	Korea Institute of Construction Technology	2002	$Pe = 0.0322H_R + 1.549$	$\sigma_{cf} < 60$MPa (limited by RBM)
	Tarkoy	1973	$Pe = 41.245e^{-0.0443 \cdot H_R}$	
	Bamford	1984	The correlation was resulted in the negative trend between rebound hardness and Pe	
Joint properties	Aeberli & Wanner	1978	The correlation was resulted in the positive trend between joint sets and Pe	It was studied for the just 4 limestones
	Sanio	1985	It was shown the relation between strike orientations of joints and tunnel axis	
Total hardness	Tarkoy	1973	The correlation was resulted in the negative trend between the total hardness and the Pe	

i_o : Net penetration rate (mm/rev)
Pe : Penetration rate (m/hour)
Fn : Thrust per cutter (kN)
σ_{cf} : Unconfined compressive strength (kgf/cm^2, MPa)
σ_{rf} : Tensile strength (MPa)
D : Disk diameter (m)
H_R : Average of rebound hardness
RBM : Raise Boring Machine

안하였는데 커터특성 및 불연속면 특성이 고려되지 않았고, 이 모델을 적용할 수 있는 암반강도의 적정 유효범위에 관하여 언급하지 않았다.

- Farmer와 Glossop(1980)은 평균 커터 당 추력과 암석의 인장강도를 사용하여 관입율을 계산하는 모델을 제안하였다. 이 모델에서도 암반의 절리면 특성과 커터특성이 고려되지 않았다.
- Bamford(1984)는 다중선형모델을 유도하였는데, 슈미트해머의 반발경도에 의해 결정되는 반발력과 전체 추력, NCB cone indentor 값, 전단저항각 등을 이용한 함수로 관입율을 예측하였다. 이 모델은 단지 1개 프로젝트의 자료를 사용하여 개발되었으며, 터널의 규모에 대한 고려가 이루어지지 않았다.
- Sanio(1985)는 간접적으로 관입율을 산정하기 위한 모델을 개발하였는데, 층리면과 수직인 경우와 평행한 경우의 관입율 사이의 비는 두 층리면에 실시한 점하중 지수의 비와 동일하다는 점을 제시하였다. 그러나 이 모델은 불연속면의 간격이 조밀한 경우 즉, 엽리와 편리 등에 대하여 암반의 보정계수로 사용될 수 있다.
- Hughes(1986)는 Graham과 유사한 모델을 발표하였고, 커터 당 추력, 일축압축강도, 디스크 직경을 포함하고 있지만, 이 모델에서도 암반의 불연속면 특성을 고려하지 않았다.
- Norwegian Tunnelling Society(1998)에서 제시한 모델(이하 NTS 모델로 칭함)은 무결암의 특성들을 천공도지수(Drilling Rate Index, DRI)의 형태로 포함하였고, 불연속면의 방향과 간격, 장비의 특성(커터 당 추력, 커터 크기, RPM)도 고려되어 졌다. 이 모델의 주요 매개변수인 DRI를 구하기 위해서는 취성도시험(Brittleness Test)과 천공모형시험(Siever's Miniature Drill Test)이 수행되며, 또한 이 모델에서는 TBM의 굴진속도와 커터소모율(Cutter Consumption), 추정 공사비 등을 종합적으로 제시하였다.

이외에도 국내에서는 한국건설기술연구원(1993), 한국자원연구소(1999) 등에서 국내의 시공사례를 토대로 TBM의 굴진속도와 매개변수들과의 연구를 수행하였고, 상기의 변수들에 대한 검증을 위주로 발표하였으나 분석대상 시공자료의 미흡에 의해 다양한 연구가 부족한 실정이다.

이와 같이 TBM의 굴진속도를 산정하기 위해서는 대상 암반의 강도특성, 절리특성뿐만 아니라 커터 및 장비특성이 중요한 매개변수임을 알 수 있었다. Table 1에는 상기에 언급된 모델들의 연구결과를 요약하였으며, 암석의 강도 및 절리특성을 나타내는 변수들을 위주로 TBM 굴진율과의 관계를 나타내었다. 일반적으로 암석강도 혹은 경도가 증가할수록 관입율이 감소하는 (-)상관성을 보이고 있는데, 이때 적정수준의 관입율을 유지하기 위해서는 추력을 증가시키는 것이 필요한 것으로 나타났다(福井 외, 2000).

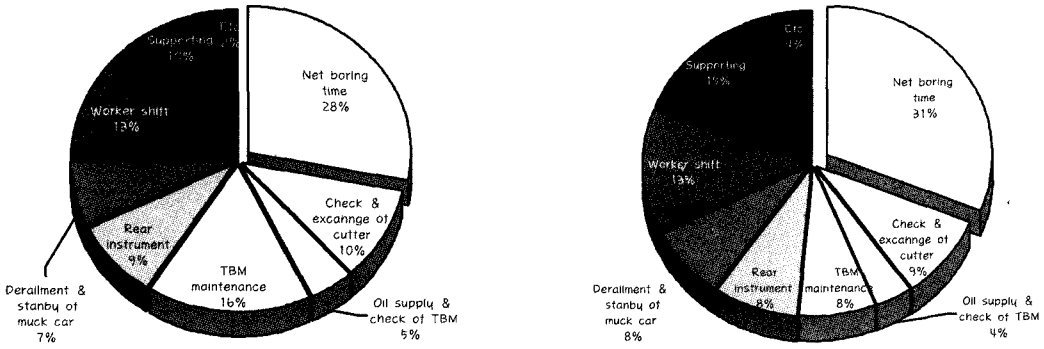
3. 국내의 TBM 굴착사례 분석

3.1 TBM 가동율 분석

가동율은 공사기간 중에 TBM이 실제 굴착에 사용된 시간을 나타내는 것으로 TBM의 굴진율을 결정짓는 중요한 요소이다. Table 2에는 국내 TBM 시공사례 중 도로터널 및 수로터널에서의 자료를 토대로 평균 가동율을 나타낸 것으로서 26.7~37.6 %의 범위를 보이며, 평균 약 30.83 %의 가동율을 나타냈다(조만섭 외, 2003).

Table 2. Average utilization and TBM diameters of domestic tunnels.

Types	Project title	TBM diameters	Average utilization(%)	Note
Roadway tunnel	H. J.	6.8mØ	33.6	
		8.0mØ	29.3	
	J. R.	4.5mØ	27.9	
		5.0mØ	33.3	
Water supply tunnel	JA(A, B, C)	3.5mØ	27.4, 37.6, 30.0	1. Total average utilization: 30.83%
	U. S.	3.5mØ	27.1	2. Generally adopted utilization for design: 33.0%
	B. A.	5.0mØ	31.4	
	K. K.	3.0mØ	36.4	
	S. D.	5.0mØ	26.7	
	P. H.	3.5mØ	34.0	
	Y. D.	3.8mØ	26.0	



(a) Roadway tunnel (4.5~8.0mØ) (b) Water supply tunnel (3.0~5.0mØ)

Fig. 1. Rate of exhausted time.

참고로 한국건설기술연구원(1993)에서는 국내외 TBM 현장의 Downtime 발생율을 제시하였고, 이 결과로부터 국외의 TBM 가동율을 추정해 보면 약 30~50%를 나타낸 경우가 가장 많았다. 국내의 경우에는 약 15~30%로서 국외의 경우에 비해 비교적 낮은 가동율을 보이고 있는데, Table 2에 나타낸 본 연구결과와 비교할 때 최근 자료를 포함한 국내의 TBM 가동율이 과거에 비해 증가된 경향임을 알 수 있었다. 그리고 Fig. 1의 (a)와 (b)에는 Table 2의 국내 TBM 굴착사례들에 대해 각 공정별 소요시간을 백분율로 나타낸 것으로서, 순굴진 시간을 제외한 Downtime들 중 비교적 높은 비중을 차지하는 공정들은 TBM정비, 지반보강, 운영교대 등으로 분석되었다.

여러 가지 downtime들 중에서 특히 TBM 및 커터정비에 소요된 총 시간은 수로터널(21%)에 비해 도로터널(31%)이 크게 나타났는데, 이는 도로터널의 TBM 직경이 수로터널에 비해 크고 또한, 연장이 약 1/2~1/10배 정도 짧기 때문에 장비점검 및 교환에 따른 사용효율이 낮아진 것으로 판단된다. 이외에 전체 공사기간에 비해 작업자가 최상의 숙련도로 작업할 수 있는 기간이 수로터널에 비해 도로터널이 짧은 점 등도 도로터널의 가동율을 저하시킨 원인으로 볼 수 있다.

3.2 TBM 월 굴진율

국내외의 TBM 시공사례들로부터 직경에 따른 월 평균 굴진율을 Fig. 2와 같이 분석하였는데, 국내자료는 총 17개(설계자료 2개 포함) 현장을 대상으로 하였고, 이들 중 월 평균 굴진율이 일반적인 범위로부터 크게 분산된 3개 자료는 상관관계 분석에서 제외하였다. 그리고 국외자료는 Norwegian Tunnelling Society (1998)에서 제시한 시공사례(7개)와 한국자원연구소(1999)에서 제시한 Tarkoy and Massiimo의 연구자료(7개)를 대상으로 분석하였다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이 TBM의 직경이 증가될수록 월 평균 굴진율은 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 각국의 기술력 및 지반조건 등이 상이하기 때문에 국내자료에 비해 국외자료의 분산이 크게 나타났다. 국내자료들에 한정하여 월 평균 굴진율과 TBM 직경과의 관계를 회귀분석한 결과, 식 (1)과 같은 지수함수를 유도할 수 있었으며 이때의 상관계수(R^2)는 0.76으로 비교적 높게 나타났다. 그러나 시공자료가 집중된 3.0~5.0 mØ의 TBM 시공자료를 고려하면 위와 같은 경향을 보이지 않았고, 약 300~400m/month 범위의 굴진율을

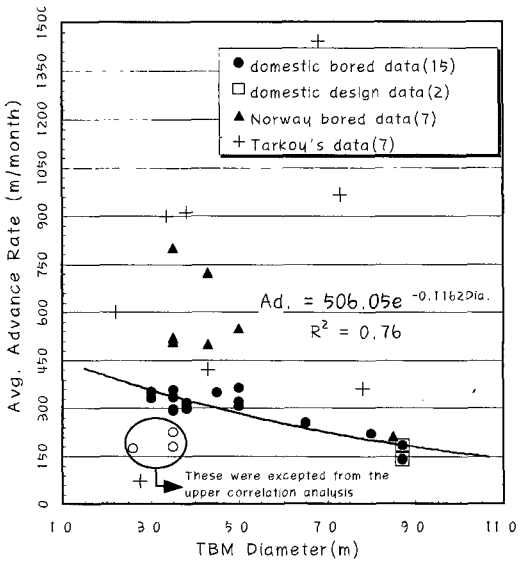


Fig. 2. Average advance rate (Ad.) per month by TBM diameter. The exponential curve was only drawn with the domestic bored data.

보이고 있다.

$$Ad(m/month) = 506.05 \cdot e^{-0.1162 \times D} \quad (1)$$

여기서, D(m)는 TBM직경

4. 경부고속철도 W터널의 TBM 굴진속도 분석

4.1 터널 현황 및 지반구성

본 연구에서는 경부고속철도 W터널에 대하여 TBM+NATM 굴착방법의 적용성 평가를 수행하였고, 전술한 다양한 예측 모델들을 대상으로 TBM의 관입율을 분석하여 상호 비교해 보았다. W터널은 총 연장이 13,270m인 장대터널로서 2개 공구로 분할되었고, 본 연구의 검토대상 공구는 Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 연장이 8,830m로써 2개의 사갱이 계획되어 있다. 본 공구의 암종분포는 사암과 셰일로 구성된 대구퇴적암층이 서울방향 갱구부에 약 700m 정도 분포하며, 이후 공구 종점까지는 극경암 및 경암에 속하는 안산암, 호온펠스, 화강암, 안산암으로 분포하고 있고, 암반 경계선에서는 관입에 의한 파쇄대가 형성되어 있다. 경부고속철도의 터널 굴착단면은 Fig. 3(b)와 같이 140m^{2}으로 복선 대단면이며, 본 공구는 최대 약 400m의 대심도 산악터널이지만 계곡부에서는 2D 이하의 저토피 구간도 3개소 통과하고 있다.

4.2 실내시험 및 현장지반조사 결과

W터널의 굴진속도 산정을 위하여 여러 모델들에 관련된 암석의 강도특성을 파악하고자 ASTM 및 ISRM에 근거한 실내시험을 수행하였고, NTS 모델에서 제안한 굴진속도 분석을 위하여 취성도시험(Brittleness test, S_{20})과 천공모형시험(Siever's miniature drill test, S_J)을 노르웨이과학기술대학(NTNU, Norwegian University of Science and Technology)에 의뢰하였다. 그리고 편광현미경에 의한 사진관측과 XRD(X선 회절분석)에 의한 조성광물의 정량분석 시험을 수행하였으며, 터널구간의 절리분포 및 방향성 조사를 위해 야외 지질조사 및 시추공 영상촬영 등을 이용한 절리면 간격, 주향 등의 조사를 수행하였다.

Table 3에는 실내시험 및 현장조사 결과를 요약하였으며, 천공도지수(DRI)와 암반절리요소(Ks)를 구하기 위한 방법을 아래의 4.3절에서 간략히 소개하고 있으나 각 조사항목 별 상세한 산출과정은 Norwegian Tunnelling Society(1998)의 자료로부터 구할 수 있다. 참고로 Table 3의 UH, UF, UB는 단순히 시료를 구분하기 위한 문자이고, 절리특성의 분석은 여러 가지 절리들 중에서 제 1 주절리의 영향만을 고려하였다.

검토대상 W터널의 셰일(UH), 안산암(UF), 화강암(UB) 등 3개 시료에 대해, 취성도시험(S_{20})과 경도시험(S_J)으로부터 구한 천공속도지수(DRI)는 안산암과 화강암이 [매우 낮음]~[낮음] 그리고 셰일이 [보통] 혹은 [높음]으로 조사되었고, TBM의 시공구간이 대부분 안산암 및 화강암으로 구성되어 있기 때문에 TBM의 굴진 시 다소 불리한 조건으로 나타났다(Fig. 6(a) 참조).

터널 축과 절리면의 각도(Joint orientation)는 45°에서 가장 유리하며 0°와 90°에 가까울수록 불리한데, 화강암(UB)의 경우가 가장 유리한 것으로 나타났다. 또한 절리등급(Joint class)은 암반절리요소(K_S)를 결정하는 중요한 변수로서 절리간격이 적을수록 굴진속도를 향상시킬 수 있는데, 본 연구의 3개 시료에 대한 절리등급(Joint class)은 셰일(UH) > 안산암(UF) > 화강암(UB)의 순으로 나타났다(Fig. 6(b) 참조).

4.3 경험식 및 NTS 모델에 의한 관입율(Pe)의 산정

본 절에서는 Table 3의 실험결과들을 이용하여 NTS

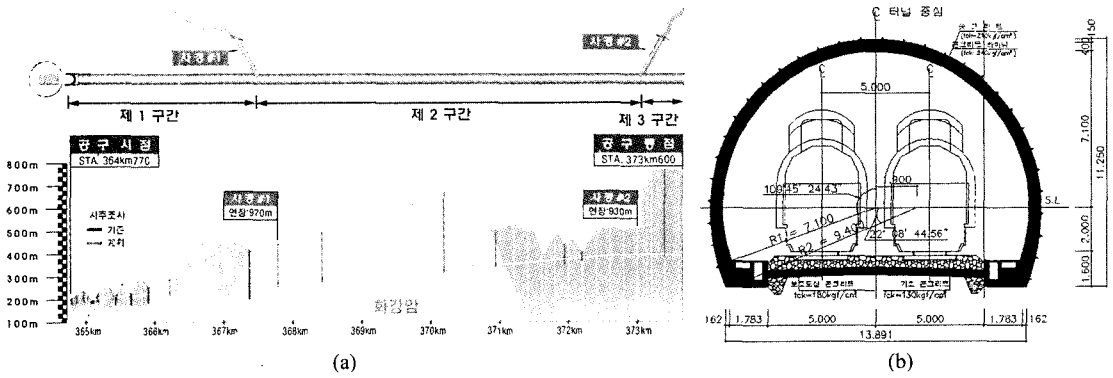


Fig. 3. Geologic profile and cross section of the W tunnel.

Table 3. Laboratory and in-situ test results.

Properties \ Rock samples	Section 1		Section 2	Note
	Shale (UH)	Andesite (UF)	Granite (UB)	
Sc (kgf/cm^2)	680~1,380	240~1,810	920~1,750	
St (kgf/cm^2)	70~130	45~150	110~170	
Content of Qz + Fs (%)	56.8	55.0	91.2	
Brittleness value (S_{20})	47.0	31.7	14.7	
Sievers' J-value (S_J)	67.4	6.1	2.4	
DRI	**57**	**29**	**35**	see Fig. 6(a)
Strike angle of joint (α_s)	N76°W	N11°W	N54°E	The tunnel of axis direction (α_t) is N3°E.
Dip angle of joint (α_f)	15	15	54	
Joint spacing	12cm	16cm	65cm	
Joint orientation (α)	14.7	3.6	39.0	
Joint class	[III]-	[II]+	[0-I]~[I]	
Fracturing factor (K_S)	**1.90**	**1.40**	**1.20**	see Fig. 6(b)

Here, • Sc : Unconfined compressive strength • St : Tensile strength • Qz : Quartz
• Fs : K-Feldspar
• Drilling Rate Index(DRI) is classified as follows ;

Category	Extremely Low	Very Low	Low	Medium	High	Very High	Extremely High
DRI	< 25	26~32	33~42	43~57	58~69	70~82	82 <

• Joint orientation (α) is the angle between tunnel axis and the planes of joint and calculated by follows equation;
$\alpha = \arcsin(\sin\alpha_f \cdot \sin(\alpha_t - \alpha_s))$
• Joint class is divided from the joint spacing as follows;

Joint Spacing	-	160cm	80cm	40cm	20cm	10cm
Joint Class	0	0-I	I-	I	II	III

모델에 의한 관입율 산정과 더불어 Table 1의 여러 학자들이 제시한 일축압축강도, 압열인장강도, 합경도(Total Hardness)를 이용한 경험식으로부터 관입율을 산정하였고, 그 결과를 상호비교하여 보았다.

(1) NTS 모델에 의한 관입율

NTS 모델은 암석의 강도특성, 장비특성, 절리특성 등 세 가지의 주요 매개변수들을 모두 반영하고 있기 때문에 비교적 적합한 예측모델이라고 판단된다. 이 모델은 현장조사를 통해 절리특성을 정확하게 반영하는 경우에 보다 적용성이 크지만, 설계단계에서와 같이 절리특성이 충분하게 반영되지 못할 때에는 다른 모델들과 마찬가지로 적용성에 한계를 가지고 있다.

NTS 모델의 굴진속도 분석을 위한 순서도를 Fig. 4에 나타내었고, 이 모델의 주요변수인 DRI를 구하기 위한 취성도시험(S_{20})과 천공모형시험(S_J)의 개요도를 Fig. 5에 나타내었다. 이 모델은 Fig. 5의 취성도시험과 천공모형시험 결과로부터 Fig. 6(a)의 도표를 이용하여 DRI를 산정하였고, Fig. 6(b)와 같이 절리간격과 절리의 방향성분을 조사하여 암반절리요소(K_S)를 결정한 후, K_{DRI}와 K_S의 곱을 통하여 암반등가절리요소(equivalent fracture factor, K_{ekv})를 산출하였다.

커터 당 추력, 커터 직경 및 커터간격의 보정계수 등을 이용하여 등가추력(equivalent thrust, M_{ekv})을 산출한 후 최종적으로 Fig. 6(c)의 도표를 이용하여 순관입율(i_o, mm/rev)을 구하였다.

Table 4에는 NTS 모델의 굴진속도 모델에 의한 각 암종별 관입율 산정결과를 정리하였는데, 커터헤드가 1회전할 때 관입되는 깊이 즉, 순관입율(i_o)은 5.4~5.7 mm/rev이며, 본 현장에서 적용할 TBM 장비의 평균 RPM을 고려할 때 1시간 당 약 2.59~2.74m의 관입율(Pe)을 나타내었다.

(2) 일축압축강도에 의한 관입율 산정

• Graham(1976):

$i_o = (3940 \times Fn) / \sigma_{cf} = (3940 \times 150kPa) /$

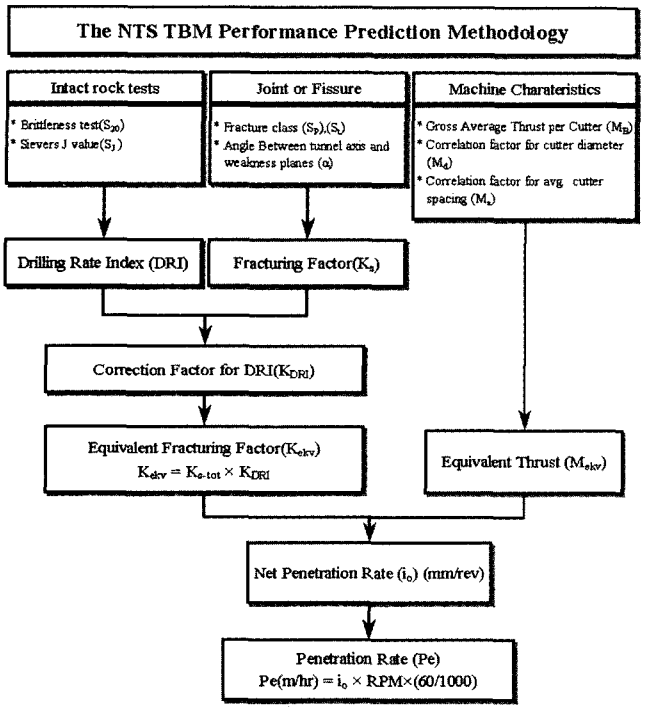
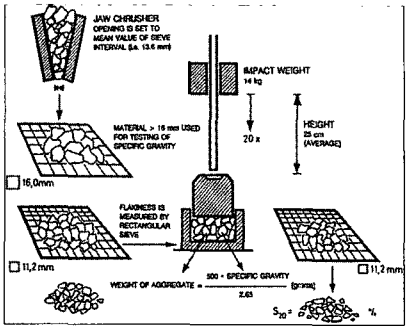
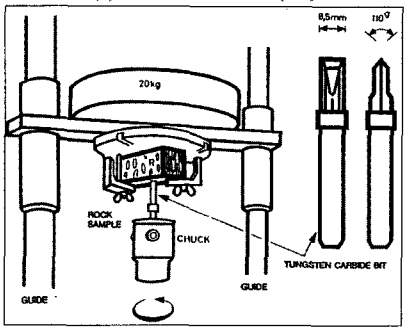


Fig. 4. Flowchart to calculate the penetration rate by NTS model.



(a) Brittleness Test (S_{20})



(b) Sievers' Miniature drill Test (S_J)

Fig. 5. Tests to induce DRI (after Norwegian Tunnelling Society, 1998).

90～181MPa = 3.27～6.50mm/rev

• Hughes(1986):

$i_o = 1.667(Fn/\sigma_{cf})^{1.2} \times (2/D)^{0.6}$

$= 1.667 \times (150 / 90 \sim 181)^{1.2} \times (2 / 0.483)^{0.6}$

$= 3.56 \sim 5.05$mm/rev

• Tarkoy(1985):

$Pe = -0.909\ln(\sigma_{cf}) + 7.2349$

$= -0.909\ \ln(90 \sim 181MPa) + 7.2349$

$= 2.51 \sim 3.14$m/hour ($i_o = 5.23 \sim 6.54$mm/rev)

• 유원건설(Table 1 참조):

$i_o = 2.5 \sim 4.0$mm/rev

(3) 압열인장강도에 의한 관입율 산정

• Farmer & Glossop(1980):

$i_o = (624/Fn)/\sigma_{rf} = (624 \times 150kPa) / 9 \sim 15MPa$

$= 6.24 \sim 10.4$mm/rev

(4) 합경도에 의한 관입율 산정

• Tarkoy(1973):

$Pe = -0.066Ht + 12.316 = -0.066 \times (120 \sim 140) + 12.316$

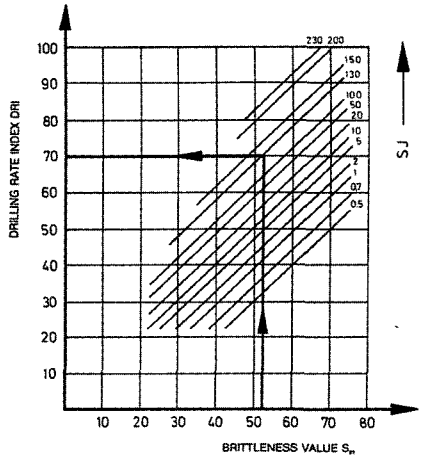
$= 3.08 \sim 4.4$ft/hour(1.93～2.75mm/rev)

(단, 안산암과 화강암의 일축압축강도를 이용하여 합경도를 산정하였고, 120～140으로 추정)

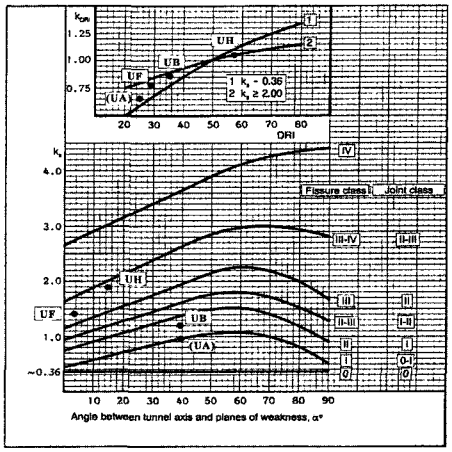
이상의 일축압축강도, 압열인장강도, 합경도를 이용한 경험적 모델들에 대하여 W터널의 TBM관입율을 산정한 결과를 Table 5에 요약하였는데, 평균 $i_o = 2.34 \sim 8.32$mm/rev로 큰 범위를 나타내었다. 여기서 암석강도·절리·장비특성 등을 모두 고려하는 NTS 모델을 기준으로 할 때, 일축압축강도를 이용한 산정결과들이 비교적 적은 차이를 보이고 있으며, 압열인장강도와 합경도를 매개변수로 한 모델에서 가장 큰 차이를 나타내었다(단, 셰일(UH)은 TBM 굴착대상 구간이 아니므로 제외함).

특히 Tarkoy의 일축압축강도 모델에 의한 관입율과 NTS 모델의 결과가 가장 유사한 결과를 나타냈지만, Tarkoy 모델에서는 TBM의 직경 및 추력과 같은 장비특성이 고려되지 않았기 때문에 본 현장에서만 국한된 결과로 사료된다. 그리고 국내 TBM 시공사에서 지표로 제시한 경험적 관입율은 NTS 모델에 의한 값보다 비교적 작은 경향을 보이고 있다.

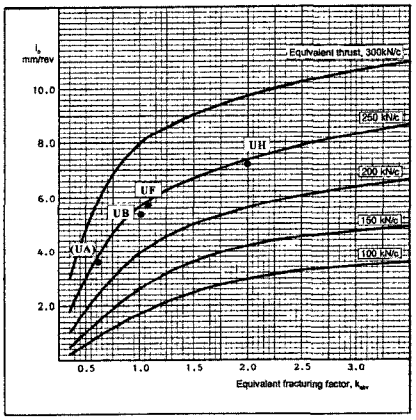
경험적 모델들 중에서는 암석의 강도특성과 TBM의 추력, 디스크의 직경 등을 이용한 Graham 모델과 Hughes 모델이 i_o = 4.9mm/rev와 4.3mm/rev으로 비교적 유사한 결과를 나타내었고, Tarkoy 모델 등과 같이 강도특



(a) DRI



(b) K_S, K_{DRI}



(c) Net penetration rate (i_o)

TBM specifications and Equivalent Thrust

TBM diameter	5.0mØ
Disk diameter	483mm
Thrust (MB)	200kN/m^2
RPM	8.0rev/min
M_{ekv}	243kN/cutter

$$M_{ekv} = M_B \cdot k_d \cdot k_a \ (kN/cutter)$$

Here, M_B is the gross average thrust per cutter. k_d is correction factor for cutter diameter, 1.19 and ka is correction factor for average cutter spacing, 1.02 (See chapter 3 in Norwegian Tunnelling Society(1998))

Fig. 6. Diagram for calculation of penetration rate (i_o) of W tunnel. The characters of UH, UF, UB and black points were plotted from the test result of specimens in Table 3.

Table 4. Calculated results of penetration rate by NTS model for the samples.

	Shale (UH)	Andesite (UF)	Granite (UB)
i_o (mm/rev)	7.2	5.7	5.4
Pe (m/hr)	3.46	2.74	2.59

성만을 이용한 경우와 큰 차이를 보이고 있다.

참고로 상기의 경험적 모델들은 상관관계에 의해 도출된 경험식들이기 때문에 사용하는 매개변수들의 단위에 주의해야 하며, 이 모델들을 사용할 경우에는 관련문헌 조사를 통해 암석종류 및 강도범위 등의 적용성 대한 검토가 선행되어야 한다.

4.4 월 평균 굴진율의 산정

W터널 대표 암종에 대한 월 평균 굴진율을 산출하여 보았고, Table 6과 같이 ① NTS 모델과 ② 경험적 모델(Table 5 참조) 그리고 ③ 국내 17개 시공사례로부터 구한 경험식으로 각각 구분하였다. 이때 TBM 가동율은 Table 2의 국내시공 실적에 의한 분석결과인 30.83%와 국내 설계적용치인 33%를 반영하였고, 작업시간은 18시간/일, 25일/월로 가정하였다.

Table 6에서 보는 바와 같이 30.83%와 33%의 가동율에 따라 약 24m/month의 차이를 나타내었고, ①의 NTS 모델에 의한 관입율과 ②의 경험적 모델들에 의한 관입율로부터 구한 월 평균 굴진율은 약 305~386m로 ③의 국내 시공사례의 상관식으로부터 구한 월 평균 굴

Table 5. Summary of calculated results of the average penetration rate by the models.

	NTS	Unconfined compressive strength				Tensile strength	Total hardness
		Graham	Hughes	Tarkoy	Yuwon Construction Co.		
i_o (mm/rev)	5.4~5.7	3.27~6.5	3.56~5.05	5.23~6.54	2.5~4.0	6.24~10.4	1.93~2.75
Average	5.55	4.9	4.3	5.9	3.25	8.32	2.34

Note: Average net penetration rate which was excepted for the minimum and maximum values of empirical models is about 4.59mm/rev.

Table 6. Summary of calculated results of the average advance rate by the models.

	i_o (mm/rev)	RPM	Pe (m/hour)	Utilization (%)	Ad (m/month)
① NTS model	5.55	8	2.6	30.83	360.7
				33.0	386.1
② Empirical models	4.59		2.2	30.83	305.2
				33.0	326.7
③ Average Ad (m) per month by TBM diameter at domestic (see Fig. 2)					283.1

※ It was supposed that the working time is respectively 18hr/day and 25days/month.

진율(약 283m)과 다소 차이를 보이고 있다. 그러나 Fig. 2에서 보는 바와 같이 국내의 TBM시공 사례들을 이용하여 TBM 직경에 따른 월 평균 굴진율을 구한 결과로부터 TBM 직경이 3.0~5.0mØ인 자료들만을 고려하면, 평균적으로 300~400m/month의 굴진율을 보이고 있어 ①과 ②의 모델로부터 구한 범위와 유사함을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구는 TBM의 설계에 대한 기술자들의 이해를 넓히고, 적절한 TBM 굴진속도의 산정기법들을 제시하기 위한 목적으로 수행하였고, 본 연구의 결과들을 요약하면 다음과 같다.

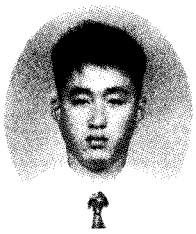
먼저, 여러 가지 경험적 모델들의 분석으로부터 설계단계에서의 TBM 굴진속도 분석은 NTS 모델과 같이 암석의 강도특성, 절리특성 및 TBM의 장비특성이 복합적으로 고려되어야 함을 확인할 수 있었다. 다음으로 국내의 도로터널 및 수로터널 등에 적용된 TBM굴착 자료를 분석한 결과, 평균 가동율은 30.83%로서 외국에 비해 낮은 경향을 보이고 있다. 그리고 TBM 직경에 따른 월 평균 굴진율의 상관식은 $Ad(m/month) = 506.05 \cdot e^{-0.1162 \times D}$로 이때 상관계수($R^2$)는 0.76이다.

이상의 분석결과로부터 경부고속철도 W터널을 대상으로 TBM(5.0mØ)의 설계 굴진속도를 상기 식과 여러 모델들로부터 구한 결과, 월 평균 굴진율은 NTS 및 경험적 모델들이 위의 상관식에 의한 결과보다 크게 산정되었다. 그러나 국내의 TBM시공 사례들을 이용하여 TBM 직경에 따른 월 평균 굴진율을 구한 결과(Fig. 2 참조)로부터, TBM 직경이 3.0~5.0mØ인 자료들만을 고려하면 유사한 범위에 속함을 알 수 있었다. 따라서 조사 자료의 신뢰성 및 대표성이 저하되는 경우, 경험적 모델들에 의한 굴진속도와 국내 시공사례를 이용한 상관식 등을 비교하여 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 이석원, 조만섭, 서경원, 배규진, 2002, 수직구 상향굴착을 위한 RBM 굴진성능의 분석, 한국지반공학회 2002년도 봄 학술발표회, 157-164.
2. 조만섭, 우동찬, 김경곤, 이진무, 2003, Q_{TBM}을 포함한 경험적 산정방법 및 NTS(NTNU)모델을 이용한 국내 TBM 설계에의 굴진속도 산정, 한국터널공학회 2003학술발표회 논문집, 102-112.
3. 한국건설기술연구원, 1993, 지하생활공간개발 요소기술 연구-지반굴착기술분야(I), 정책연구보고서, 1-4~1-127
4. 한국건설기술연구원, 2002, 철도터널 내공단면적 저감을 위한 통풍공(Air-Shaft)의 공기역학 설계기술 및 수직구 굴착공법 개발, '99산 · 학 · 연 공동연구개발사업 최종보고서, 546-566.
5. 한국고속철도건설공단, 2003, 경부고속철도 제OO-O공구 노반신설 기타공사 설계보고서.
6. 한국자원연구소, 1999, 밀양댐 도수로 터널의 암반물성 및 TBM굴착 분석연구 최종보고서, 50-57.

7. M. Alvarez Grima, P. A. Bruines and P. N. W. Verhoef, 2000, Modeling Tunnel Boring Machine Performance by Neuro-Fuzzy Methods, Tunnelling and Underground Space Technology, (15)3, 256-269.
8. Norwegian Tunnelling Society, 1998, Norwegian TBM Tunnelling, PUBLICATION NO. 11, 29-34
9. U.S. Army Corps, 1997, Engineering and Design Tunnels and Shafts in Rock, Engineering Manual 1110-2-2901, C-1-C14.
10. 福井勝則, 大久保誠介, 松本一騎, 名和芳久, 酒井照夫, 西澤泉, 2000, TBMの掘削抵抗を利用した岩盤分類-花崗岩の事例, 資源と素材學會, 資源と素材, 116(10), 831-838.



조 만 섭

1991년 전북대학교 자원공학과 공학사
1993년 전북대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2001년 전북대학교 대학원 자원공학과 공학박사
Tel: 02-3485-3533
E-Mail: mscho66@cricmail.net
현재 (주)유니벡 토목사업본부 터널팀 차장

김 경 곤

1977년 한양대학교 토목공학과 공학사
1979년 서울대학교 대학원 도시계획공학과 공학석사

Tel: 02-3485-3513
E-Mail: tunnel@univec.co.kr
현재 (주)유니벡 사장

우 동 찬

1984년 연세대학교 토목공학과 공학사
1986년 연세대학교 대학원 토목공학과 공학석사

Tel: 02-3485-3582
E-Mail: charlliewoo@hanmail.net
현재 (주)유니벡 토목사업본부 터널팀장 이사

이 진 무

1986년 연세대학교 지질학과 이학사

Tel: 02-3700-7483
E-Mail: jmlee-d@skec.co.kr
현재 (주)SK건설 토목T/K팀 부장