

민감도 분석을 통한 TBM 굴진성능 예측 모델 영향 인자 분석



고 태 영
SK건설(주)
TBM TF 부장
(tyko@sk.com)



윤 현 진
SK건설(주)
TBM TF 과장
(hyunjin@sk.com)



김 도 훈
SK건설(주)
TBM TF 사원
(anguf@sk.com)



김 택 곤
SK건설(주)
TBM TF장
(tkkim@sk.com)

1. 서론

TBM의 굴진성능(performance)은 일반적으로 굴진율(advance rate)과 디스크 커터의 수명으로 표현하며, 전체 TBM 공사기간과 공사비 예측에 영향을 주는 중요한 인자이다. TBM의 굴진성능은 TBM 자체의 기능적 성능뿐만 아니라 현장 운영 능력, 필요한 부품의 적시 조달, 유지관리 등의 인적 물적 요인과 함께 굴착구간 암반의 물성 및 지질학적인 특성에도 영향을 받는다.

TBM의 굴진성능의 예측을 위해 다양한 모델들이 제안되어 왔다. 암반의 물성, 지질학적인 특성 및 TBM 장비의 여러 특징을 사용하여 면판(cutter head)의 회전당 관입깊이(penetration)를 추정하고 TBM 유지보수, 현장운영 등을 고려한 TBM의 가동율(utilization)을 적용하여 굴진율을 산정하게 된다. 디스크 커터의 수명은 모델에서 예측한 관입깊이와 마모

지수(abrasiveness index) 등을 이용하여 예측할 수 있다.

TBM 굴진성능 예측모델을 크게 나누어 보면 개별 디스크 커터의 작용력을 기반으로 하는 이론적인 모델과 TBM 현장 사례들을 기반으로 하는 경험적 모델로 나눌 수 있다. 이론적 모델의 대표적인 사례를 미국 Colorado School of Mines의 CSM 모델(Rostami and Ozdemir, 1993; Rostami, 1997)로 선형절삭시험(linear cutting test) 결과와 현장 자료들을 근거로 하여 대상암반의 역학적 특성과 디스크 커터의 작용하중과의 관계를 이용한다. 경험적 모델의 대표적인 예는 노르웨이 Norwegian University of Science and Technology의 NTNU 모델(Bruland, 1998)을 들 수 있다. NTNU 모델은 주로 노르웨이 및 기타 국가들의 35개 TBM 현장 자료들을 바탕으로 만들어졌다.

본 고에서는 이론적인 모델인 CSM 모델과 경험적인 모델인 NTNU 모델의 굴진성능 예측에 미치는 영

향 인자를 입력자료들의 민감도 분석을 통해 살펴보았다. 하나의 입력자료 값을 최소에서 최대로 변화시키는 동안 다른 입력자료들은 평균값으로 고정하여 굴진 성능인 관입깊이와 디스크 커터의 수명을 추정하여, 각각의 입력자료들이 굴진성능에 미치는 영향을 분석하였다.

2. CSM 모델

CSM 모델은 디스크 커터에 작용하는 하중을 바탕으로 하는 모델이다. 디스크 커터가 암반에 관입하여 절삭할 때 디스크 커터에 작용하는 총하중(total force, F_t)은 다음의 식 (1)과 같이 표현할 수 있다(Fig. 1).

$$F_t = C \cdot T \cdot R \cdot \varphi \sqrt[3]{\frac{\sigma_c^2 \sigma_t S}{\varphi \sqrt{RT}}} \quad (1)$$

여기서 C = 상수로 2.12, T = 디스크 커터 팁의 너비, R = 디스크 커터의 반지름, σ_c = 일축압축강도, σ_t = 압열인장강도, S = 디스크 커터 간격이고, φ = 접촉면의 각도로 다음의 식 (2)와 같으며, p = 관입깊이이다.

$$\varphi = \cos^{-1} \left(\frac{R-p}{R} \right) \quad (2)$$

식(1)에서 구한 총하중으로부터 연직작용력(normal

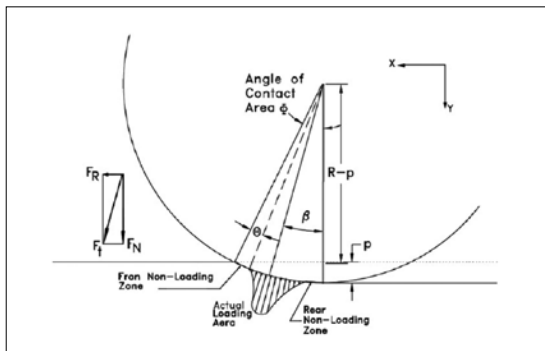


Fig. 1. Longitudinal cross section of disc cutter - rock contact area

Table 1. Maximum normal force for a disc cutter(Cigla et al., 2001)

Disc cutter diameter	Maximum normal force	Cutter tip width
17 inch (432 mm)	222 kN	15,875 mm
	267 kN	19,05 mm
19 inch (483 mm)	311 kN	19,05 mm

force, F_N)과 수평작용력(rolling force, F_R)은 다음의 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_N = F_t \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right), \quad F_R = F_t \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (3)$$

식 (1)과 (2)에서 사용된 암반물성 및 TBM의 사양과 관련된 입력변수가 모두 고정되었다고 가정하면, 관입깊이가 유일한 변수가 되므로 식 (3)의 연직작용력이 디스크 커터의 최대 허용치에 이를 때의 관입깊이가 바로 CSM 모델에서의 관입깊이가 된다.

일반적으로 적용되는 디스크 커터의 최대 연직작용력을 Table 1에 나타내었다.

CSM 모델에서의 디스크 커터 수명은 세르샤 마모지수(Cerchar Abrasiveness Index, CAI)를 이용하여 예측하게 된다.

Rostami(2005)는 마모가 되어 교체될 때까지 디스크 커터가 회전하여 절삭할 수 있는 최대의 선형 거리(CL)를 식(4)와 같이 제시하였다.

$$CL = \frac{2054 D_c}{CAI 432} \text{ [km]} \quad (4)$$

여기서, D_c 는 디스크 커터의 직경 [mm]이다.

면판이 1회 회전할 때 디스크 커터들의 평균 회전거리와 최대 절삭거리의 관계를 이용하면 디스크 커터가 교체될 때까지의 면판의 최대 회전수(U_c)를 다음의 식 (5)와 같이 유도할 수 있다.

$$U_c = \frac{CL \cdot 1000 \cdot k}{0.6 D \pi} \quad (5)$$

여기서, D = 면판의 직경, k = 디스크 위치에 관련된 마모 보정계수로 일반적으로 0.67이 사용된다.

CSM 모델에서의 디스크 커터의 수명(H_f)은 식 (6)과 같다.

$$H_f = \frac{D^2 \pi}{4} U_c \cdot \frac{p}{1000} \cdot \frac{2S}{D \cdot 1000} \cdot [m^3/c] \quad (6)$$

디스크 커터의 수명은 디스크 커터 당 굴착부피(H_f) 뿐만 아니라 굴착거리(H_m), 사용시간(H_t)으로도 표현이 가능하며, 이렇게 굴착거리나 사용시간으로 표현하면 디스크 교체 시기를 예측하는 데 편리한 장점이 있다. 디스크 커터 당 굴착부피를 굴착 단면적으로 나누어 주면 디스크 커터 당 굴착거리로 표현이 가능하고, 이를 다시 회전당 관입깊이와 면판의 회전속도의 함수인 단위 관입률(net penetration ratio)로 나누어 주면 디스크 커터 당 사용시간으로 표현된다.

3. NTNU 모델

NTNU 모델은 암반의 물성과 TBM 관련 입력자료를 바탕으로 성능을 예측하는데, 여러 암반 물성을 하나의 변수인 등가균열계수 (equivalent fracturing factor)로 나타내고, 여러 TBM 변수들을 하나의 변수인 등가 추력(equivalent thrust)으로 환산하여 사용

한다.

등가균열인자는 암반 내의 균열 종류(fissure or joint), 암반의 균열도(fracturing degree), 터널축과 불연속면이 이루는 각도, DRI(Drilling rate index)로 표현되는 암석강도, 공극률(porosity)에 의해서 결정된다.

균열도와 터널축과 불연속면이 이루는 각도를 이용해 균열계수 (fracturing factor, k_s)를 결정한다(Fig. 2). 하나 이상의 균열군이 있을 경우 총균열계수(total fracturing factor, k_{s-tot})는 다음의 식 (7)과 같이 계산한다.

$$k_{s-tot} = \left(\sum_{i=1}^n k_{si} \right) - (n-1) \cdot 0.36 \quad (7)$$

여기서, k_{si} = i번째군에 대한 균열계수, n = 균열군의 개수이다.

암반 물성에 관련된 등가균열계수(k_{ekv})는 다음의 식 (8)과 같이 정의한다.

$$k_{ekv} = k_{s-tot} \cdot k_{DRI} \cdot k_{por} \quad (8)$$

여기서, k_{DRI} = DRI에 대한 보정계수, k_{por} = 공극률에 대한 보정계수이다.

등가추력(M_{ekv})은 디스크 커터당 최대 평균 추력(M_B)와 디스크 커터의 크기에 대한 보정계수(k_d), 디스크 커터의 간격에 대한 보정계수(k_a)로 계산할 수 있으며 식(9)와 같다.

$$M_{ekv} = M_B \cdot k_d \cdot k_a \text{ (kN/cutter)} \quad (9)$$

다음의 Table 2에 디스크 커터 당 최대 평균 추력을 나타내었다.

Table 2. Recommended maximum gross average thrust per disc

Disc cutter diameter	Maximum gross average thrust per disc
394 mm (15 inch)	180 ~ 200 kN/cutter
432 mm (17 inch)	210 ~ 230 kN/cutter
483 mm (19 inch)	260 ~ 280 kN/cutter

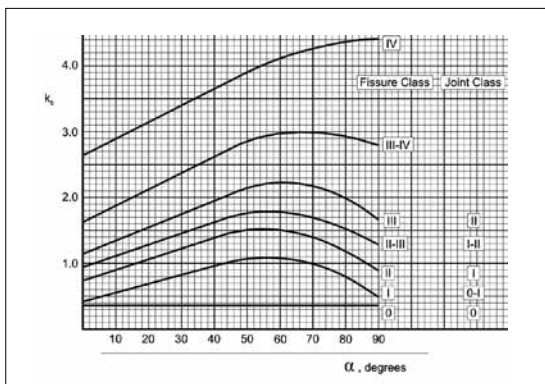


Fig 2. Fracturing factor

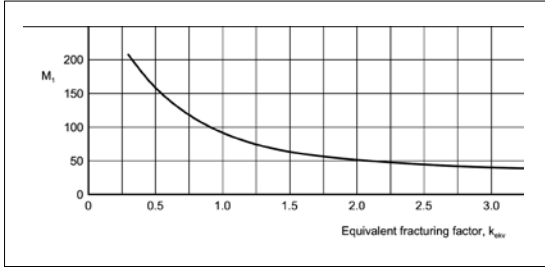


Fig 3. Critical thrust as a function of the equivalent fracturing factor

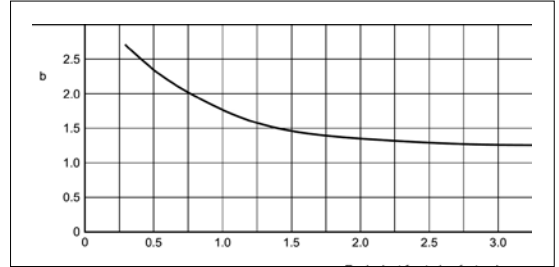


Fig 4. Penetration coefficient as a function of the equivalent fracturing factor

관입깊이(i_0)는 식(10)과 같이 등가추력, 면판 회전당 1mm의 관입깊이를 낼 수 있는 임계추력(M_1), 그리고 관입계수(b)의 함수로 나타내어지며, 임계추력과 관입계수는 각각 Fig. 3과 4에서와 같이 등가균열계수로부터 구할 수 있다.

$$i_0 = \left(\frac{M_{ekv}}{M_1} \right)^b \quad (10)$$

NTNU모델에서의 디스크 커터 수명은 Fig. 5와 같이 커터수명지수 (Cutter life index, CLI)로부터 디스크

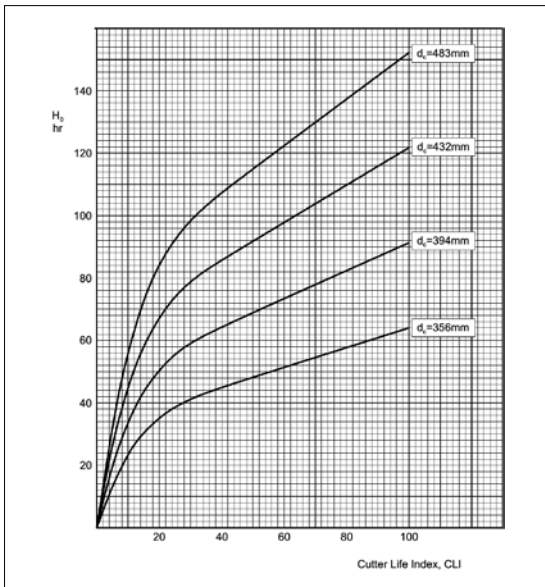


Fig 5. Basic cutter ring life, H_0

크 커터 크기별 기본 수명시간(H_0)을 구한 후, 식 (11)을 이용하여 추정한다.

$$H_f = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{H_0 \cdot k_D \cdot k_Q \cdot k_{RPM} \cdot k_N}{N} \cdot p \cdot RPM \cdot \frac{60}{1000} \text{ [m}^3/\text{c]} \quad (11)$$

여기서, RPM = 면판의 분당 회전수

k_D = 면판 크기에 대한 보정계수

k_Q = 석영 함유량(Q%)에 대한 보정계수

k_{RPM} = 면판 회전속도에 대한 보정계수

k_N = 디스크 커터 개수에 대한 보정계수이다.

4. 민감도 분석

예측모델에 대한 입력변수들의 영향은 민감도 분석에 의해 수행되었다. 영향을 분석하기 위한 변수가 최소에서 최대값까지 변하는 동안 다른 변수들은 평균값으로 고정하여 예측모델에 적용되었다. 사용된 지반물성값은 다음의 Table 3에 있으며, 분석에 적용된 TBM은 open gripper TBM이고, 사양은 Table 4에 나타내었다.

NTNU 모델은 DRI와 CLI값을 필요로 하는데 이 값들은 각각 일축압축강도(Uniaxial compressive strength, UCS)와 CAI로부터 추정식을 사용하여 적용하였다.

Table 3. Input parameters for performance prediction models

Input parameter	Min.	Average	Max.
UCS [MPa]	130	175	250
BTS [MPa]	5	7	10
CAI	3.4	4.8	6.1
Fracturing factor	0.36	0.90	1.73
Quartz content [%]	37	50	80
Thrust per cutter [kN]	150	230	300

Table 4. Specification for TBM

Parameters	Values
Machine Diameter	6.3 m
Cutters	17 inch (432 mm)
Number of Disc Cutters	43
Cutterhead	
Normal Operating Cutterhead Thrust @ 4200PSI	12,756.5 kN
Periodic Maximum Cutterhead Thrust @4500PSI	13,667 kN
Cutterhead Drive	Electric motors, gear reducers and brake
Cutterhead Power	2,954 HP
Cutterhead Speed	0~10.8 rpm
Cutterhead Torque @ 10.8 rpm	2,083 kN · m
Main Thrust Cylinders	
Stroke	1.83 m (72 inches)
Number of Main Thrust Cylinders	4
Hydraulic System – Power	150 HP
Maximum System Pressure	365 bar (5,300 psi)
System Operating Pressure	290 bar (4,200 psi)
Machine Conveyor	
Width	914.4 mm (30 inches)
TBM Weight (approximately)	250 Ton

5. 결과 및 토의

5.1 CSM 모델

UCS가 증가함에 따라 예측된 관입깊이는 감소하였다. UCS가 130 MPa에서 250MPa로 증가했을 때 관입깊이는 대략 11.0mm 감소하였다(73.8% 감소). 압열인장강도(Brazilian tensile strength, BTS)가 증가함에 따라 관입깊이 또한 감소하였다. BTS가 5MPa에서 10MPa로 증가했을 때 관입깊이는 5.8mm 감소하였다(50.8% 감소). 이와는 대조적으로 디스크 커터 추력의 증가는 관입깊이를 증가시켰다. 디스크 커터에 작용하는 추력이 150kN에서 300kN으로 증가했을 때 관입깊이는 16.24mm 증가하였다(838.2% 증가).

디스크 커터 수명도 관입깊이와 비슷한 경향을 보였다. UCS와 BTS가 증가함에 따라 디스크 커터의 수명도 감소하여 디스크 당 굴착부피가 감소하였고, CAI가 증가했을 때 디스크 당 굴착부피는 감소하였다. 디스크 커터에 작용하는 추력이 증가했을 때 디스크 당 굴착부피는 증가하였다.

Fig. 6은 관입깊이와 디스크커터의 수명을 입력변수의 변이에 따라 지반물성값의 평균에서 추정된 값으로 정규화 하여 나타낸 것이다. CSM모델에서는 디스크 커터에 작용하는 추력이 가장 큰 영향을 미치는 것

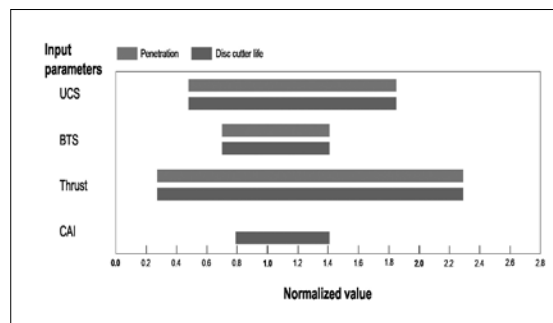


Fig 6. Normalized values of predicted penetration and disc cutter life in CSM model

으로 나타났으며, 그 다음은 UCS, BTS, CAI의 순이었다.

5.2 NTNU 모델

UCS가 증가함에 따라 예측된 관입깊이는 감소하였다. UCS가 130 MPa에서 250MPa로 증가했을 때 관입깊이는 대략 1.21mm 감소하였다(20.9% 감소). 이와는 반대로 디스크 커터 추력의 증가는 관입깊이를 증가시켰다. 디스크 커터에 작용하는 추력이 150kN에서 300kN으로 증가했을 때 관입깊이는 6.38mm 증가하였다(375% 증가). 균열계수의 증가 또한 관입깊이를 증가시켰다. 균열계수가 0.36에서 1.73으로 증가했을 때 관입깊이는 5.95mm 증가하였다(406.7% 증가).

디스크 커터 수명은 UCS, CAI, 석영함량이 증가함에 따라 감소하였으며, 디스크 커터에 작용하는 추력과 균열계수가 증가했을 때 디스크 커터의 수명인 디스크 당 굴착부피는 증가하였다.

Fig. 7은 관입깊이와 디스크커터의 수명을 입력변수의 변이에 따라 지반물성값의 평균에서 추정된 값으로 정규화 하여 나타낸 것이다. NTNU모델의 예측된 관입깊이는 디스크 커터에 작용하는 추력과 균열계수가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, UCS는 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 디스크커

터의 수명은 디스크 커터에 작용하는 추력과 균열계수가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 그 다음은 CAI, 석영함량 순이었다. CAI가 디스크커터의 수명에 미치는 영향은 CSM 모델보다 더 큰 것으로 나타났다. 관입깊이와 마찬가지로 UCS가 디스크커터의 수명에 미치는 영향은 작은 것으로 나타났다.

6. 결론

본 연구에서는 이론적인 모델인 CSM 모델과 경험적인 모델인 NTNU 모델의 굴진성능 예측에 미치는 영향 인자를 입력자료들의 민감도 분석을 통해 살펴보고, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

첫째, CSM 모델의 경우 관입깊이는 디스크 커터에 작용하는 추력, UCS, BTS의 순서로 영향을 크게 미치는 것으로 나타났다. 디스크 커터의 수명도 디스크 커터에 작용하는 추력과 UCS에 큰 영향을 받으며, BTS와 CAI가 미치는 영향은 서로 유사한 것으로 파악되었다.

둘째, NTNU 모델의 경우 관입깊이는 디스크 커터에 작용하는 추력과 균열계수가 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, UCS는 CSM 모델과 비교했을 때 그 영향이 매우 작음을 알 수 있었다. 디스크 커터의 수명도 디스크 커터에 작용하는 추력과 균열계수에 큰 영향을 받으며, 그 다음은 CAI 및 석영함량의 순이었다. 관입깊이의 경우와 마찬가지로 UCS의 영향은 작은 것으로 나타났으며, CSM 모델과 비교했을 때 CAI가 미치는 영향은 더 큰 것으로 파악되었다.

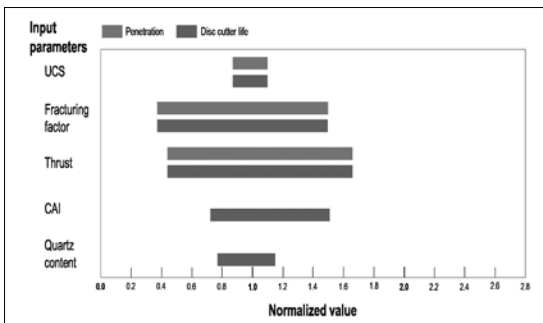


Fig 7. Normalized values of predicted penetration and disc cutter life in NTNU model

참고 문헌

1. Bruland, A. (1998), "Hard Rock Tunnel Boring - Advance rate and cutter wear", Vol. 3, Doctoral Thesis at NTNU.
2. Cigla, M., Yagiz, S., and Ozdemir, L. (2001), "Application of

tunnel boring machines in underground mine development”, Proceedings of 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey, Ankara, Turkey, pp. 155–164.

3. Rostami, J. (1997), Development of a Force Estimation Model for Rock Fragmentation with Disc Cutters through Theoretical Modeling and Physical Measurement of Crushed Zone Pressure. Ph.D. Thesis, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA, p. 249.
4. Rostami, J., Ozdemir, L. (1993), “A new model for

performance prediction of hard rock TBMs”, Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC), Boston, U.S.A., pp.793–809.

5. Rostami, J., Ozdemir, L., Bruland, A., Daul, F. (2005), “Review of issues related to Cerchar abrasivity testing and their implications on investigations and cutter cost estimates”, Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC), Seattle, U.S.A., pp. 738–751.

