

셴드TBM의 현장 디스크커터 관입깊이에 대한 연구

김상환^{1*} · 박인준² · 장수호³

¹정회원, 호서대학교 토목공학과 교수

²정회원, 한서대학교 토목공학과 교수

³정회원, 한국건설 기술연구원 Geo-인프라연구실 연구위원

Evaluation of disc cutter penetration depth of shield TBM in practice

Sang-Hwan Kim^{1*}, In-Joon Park², Soo-Ho Chang³

¹Department of Civil Engineering, Hoseo University, Professor

²Department of Civil Engineering, Hanseo University, Professor

³Geo technical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Research Fellow

ABSTRACT: This paper describes the evaluation of shield TBM disc cutter penetration depth in practice. In this study the disc cutter penetration depth used to design the excavation speed of tunnel is reviewed. The characteristics of ground encountered in the investigation site are analysed and evaluated. The shield TBM used in the field is reviewed to verify the applicability of machine in the site. The thrust and torque capacities of each TBM disc cutter are also evaluated. Based on the field data, the excavation volume and speed are re-analysed to evaluate the disc cutter penetration depth used in the design stage. It is clearly found that the design value of disc cutter penetration depth needs to modify when estimation of the TBM capacities in very hard rock formation ($S_c > 150$ MPa).

Keywords: Disc cutter penetration depth, Double and single shield TBM, Excavation volume and speed

초 록: 이 연구는 TBM의 디스크커터 관입깊이에 대하여 실질적인 현장을 통하여 평가한 것이다. 연구를 위하여 설계시 적용되는 디스크커터 관입깊이에 대하여 검토하였다. 또한 대상 현장에 대한 지반특성에 대하여 검토하고 현장에 투입된 장비에 대한 적용성에 대하여 분석하였다. 특히 장비의 용량분석을 실시하여 적합성에 대하여 평가하였다. 이러한 평가결과와 현장 공사자료를 근거로 실질적인 TBM의 공사량과 굴진속도를 분석하였다. 이 결과로부터 설계시 적용된 TBM의 디스크커터 관입깊이에 대하여 재평가 하였다. 연구 결과로부터 설계시 적용되는 디스크커터 관입깊이는 특히 극경암 지반($S_c > 150$ MPa)에 있어서 적용값의 변경이 필요하다는 것을 명백히 보여주었다.

주요어: 디스크커터 관입깊이, Single 셴드TBM, 굴착량과 굴진속도

1. 서 론

TBM 터널공법은 디스크커터의 회전 압축력으로 굴착을 실시한 후 지보재 또는 콘크리트 라이닝을 설치하여 터널을 시공하는 방법으로서 특징적으로 여타의 공법에 비하여 굴진속도가 빠르며(평균 10 m/일), 신선하고 균질한 암반층에 일반적으로 적합하

다. 또한 원형 단면으로 불필요한 공간의 발생을 최소화 할 수 있다는 장점 때문에 최근에 터널공사에 적용되고 있다. TBM에 있어서 굴진속도를 좌우하는 핵심은 암 절삭 또는 굴착기술이다. 암 절삭에 있어서 디스크커터는 매우 중요한 요소로 많은 연구자에 의하여 현재까지 연구되어지고 있다. 디스크커터의 굴삭모델에 대하여서는 현장측정과 실험을 통하여 많이 제시되어 있으나 등방하고 균질한 암반에서 TBM 굴진능력을 예측하는 것이 주를 이루었다(Graham, 1976; Nelson et al., 1985; Hughes, 1986). 특히 암

*Corresponding author: Sang-Hwan Kim
E-mail: kimsh@hoseo.edu

Received May 1, 2013; Revised May 13, 2013;
Accepted May 27, 2013

절삭기술에 대하여 새로운 메카니즘을 이용하여 가볍고 빠르게 암을 굴삭 할 수 있는 디스크커터 개발 연구를 하였다(Hood & Alehossein, 2000). 또한 TBM의 운영은 지질학적 특성과 관련된 압편의 효율적인 처리능력에 좌우된다. 이 점을 착안하여 Gong et al. (2005)은 절리특성을 고려한 2차원적 수치해석을 실시하여 압편에 대한 절리방향에 대한 영향을 연구하였다. 그러나 이러한 연구 결과를 이용한 굴진 효율의 예측은 실제 현장과 다소 차이를 보여 주고 있기 때문에 설계시 예측한 디스크커터의 실제 현장적용성에 대한 평가와 아울러 적용기준을 제시할 필요가 있다.

따라서 본 연구는 실제 현장자료 분석을 통하여 설계시 적용된 TBM 굴진 요소 중 디스크커터의 관입 깊이에 대하여 현장자료를 통하여 향후 설계시 적용할 값에 대하여 제시하였다. 이 연구를 위하여 OO전력 구공사 TBM 공사구간의 암반구간에 대하여 실질적인 암반상태를 규명하기 위하여 실내 및 현장시험을 실시하고 그 결과를 근거로 암반상태를 분석하였으며 굴착적정성을 검토하였다. 또한 실질적으로 현장에서 사용된 쉴드TBM 장비들에 대한 적용성에 대하여 검토하였다.

이러한 검토 결과로부터 현재 지반조건상 투입된 TBM 장비에 있어서 버력 처리나 기계조립 및 해체에 대한 공기를 제외한 굴착량을 분석하여 설계시 적용

된 디스크커터 관입깊이에 대하여 평가하고 이를 근거로 향후 TBM 굴착량 예측 설계시 적용할 합리적인 기준을 제시하였다.

2. 관련 기준 분석

일반적으로 적용되고 있는 압축강도에 따른 TBM 디스크커터 관입깊이, P_c 값(TBM 적산자료, 한국전력)에 대한 기준을 정리하여 나타내면 Table 1과 같이 규정되어 있다.

상기 기준에서 보여주는 것과 같이 암석의 구분은 경암까지 제시되어있으며, 일축압축강도가 150 MPa 이상인 경우에 대하여서는 P_c 값이 규정되어 있지 않고 경암으로 고려하여 적용하고 있는 실정이다. 실질적으로 암석의 구분에 있어서는 경암보다 강한 암석을 극경암으로 구분하는 것이 일반적이다. 따라서 150 MPa 이상의 강도를 가지는 극경암에 대한 P_c 값의 산정이 요구된다.

3. 현장지반조건

실질적으로는 터널굴착이 조사 심도보다 더 깊은 지반에서 이루어짐에 따라 굴착시의 암반상태는 매우 다른 결과로 나타났으며 설계시 적용된 암석의 강도

Table 1. General values of shield TBM disc cutter penetration depth (P_c) in Korea (KEPCO)

Rock	Unconfined Compressive Strength, S_c (MPa)	P_c (cm)	
		Range	Values
Hard	130~150	0.27~0.32	0.30
Medium	100~130	0.32~0.38	0.35
Soft	70~100	0.38~0.42	0.40
Weathered	50~70	0.24~0.47	0.45

Table 2. Rock strength and type at each section

Station	Length	Design stage	During excavation
No.55+3.6~No.84+10	581 m	Hard rock, 95~122 MPa	Very hard rock, 183~188 MPa
No.84+10~No.89+05	95 m	Soft rock	Hard rock
No.89+05~No.103+00	275 m	Weathered rock	Hard rock, 141 MPa

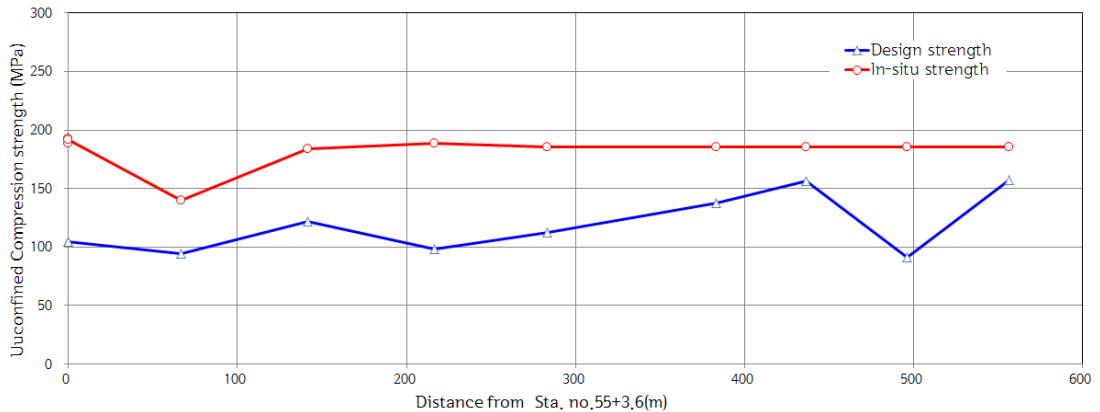


Fig. 1. Comparison of rock strength between design and construction stage

Table 3. Atomic% of Si

Specimen	Si	Average
1	37.92%	33.62%
2	29.32%	

보다 더 큰 값을 보여 주었다.

현장조사 결과에 따라 대표적인 구간에서 암질변화에 대하여 정리하면 Table 2와 같다.

현장에서 채취한 14개의 암편 시료를 이용하여 실내시험을 실시하고 일축압축강도와 석영성분에 대한 시험결과를 분석하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

암석의 일축압축강도의 경우 노선 굴진 방향으로 위치별 설계시와 시공시 압축강도를 나타내면 Fig. 1과 같으며, 평균 185.3 MPa (184~192 MPa)의 강도를 보여주고 있다. 이 결과로부터 설계시와 시공시의 암반강도의 차이가 많이 있음을 알 수 있다.

석영성분의 경우 실험결과를 요약하면 Table 3와 같으며 29.32~37.92%의 범위로 평균 33.62%로 나타났다.

4. TBM 장비의 현장 적용성

샐드TBM의 디스크커터 관입깊이에 대한 현장자료의 신뢰성 검증을 위하여서는 우선적으로 사용 장

비의 현장 적용성 검증이 요구되었다. 따라서 이 연구에서는 실질적으로 현장에서 사용된 Single 샐드TBM에 대한 장비의 적정성에 대하여 장비의 용량 검토 등을 포함하여 상세한 검증을 실시하였다.

Single 샐드TBM의 경우 세그먼트 반력을 이용하여 장비가 추진되므로 굴착과 세그먼트 조립공정을 동시에 진행할 수 없기 때문에 경우에 따라 사이클 타임이 지연될 수 있다. 그러나 숙련된 기술자를 투입하여 세그먼트 조립시간의 단축을 유지할 수 있다. 장비의 설비가 간단하고, 본체 내에 운전실이 위치하여 버력 처리의 효율을 높일 수 있고, EPB 기능에 있어서 유동성이 높은 지반이나 단층파쇄대구간의 굴진 대응능력이 높다.

이 장비의 실물과 투입 전 실시한 적격성에 대한 검사와 승인을 실시하는 모습은 Fig. 2와 같다.

또한 현장에서 사용된 Single 샐드TBM 장비에 대한 Cutter head부의 기계적 제원을 요약 정리하면 Table 4와 같다.

샐드TBM 장비의 현장 적용성 검토에서 장비의 용량분석은 매우 중요하다. 또한 용량분석에 있어서

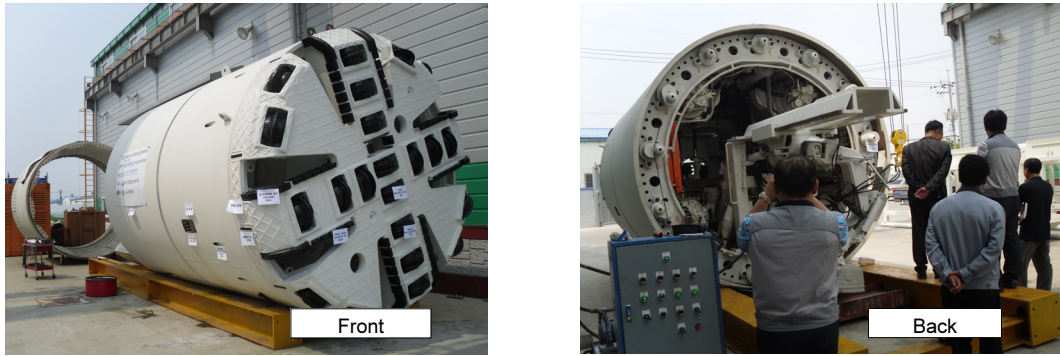


Fig. 2. Inspection of Single Shield TBM

Table 4. Single Shield TBM Cutter Head

Items	Single Shield TBM
Outer Dia.	Φ3,535 mm
Overall Length	7,340 mm
Thrust Jack	85 ton × 1680 stroke × 13 EA
Shield Jack	
Main Gripper Jack	Single EPB TBM
Front Gripper Jack	
Cutting Torque	Normal 51 t-m (8.4 rpm) Max. 125 t-m (3.3 rpm)
Cutter Disc Revolution	0-8.4 rpm

Table 5. Cutter diameters and load rating (Roby et al., 2008)

Diameter (inch)	Load (kN)	Year Introduced
11	85	1961
12	125	1969
13	145	1980
14	165	1976
15.5	200	1973
16.25	200	1987
17	215	1983
19	312	1989
20	312	2006

는 디스크커터의 최대용량, TBM 추력용량, TBM 토크용량 등이 필수적으로 검증되어야 한다. 장비의 용량검토에 요구되는 기본항목으로는 암석의 평균 일축 압축강도, 디스크커터의 직경 그리고 디스크커터의 최대용량이 요구된다. 이 연구에서는 암석의 평균 일

축압축강도의 경우 현장에서 실시한 실내강도시험 결과로부터 185.3 MPa을 적용하였다.

디스크커터 직경의 경우는 15.5인치(394 mm)이며, 이 경우 디스크커터 최대용량은 Joe Roby 등에 의해 Table 5에 제시된 년대별 커터크기에 따른 용량에

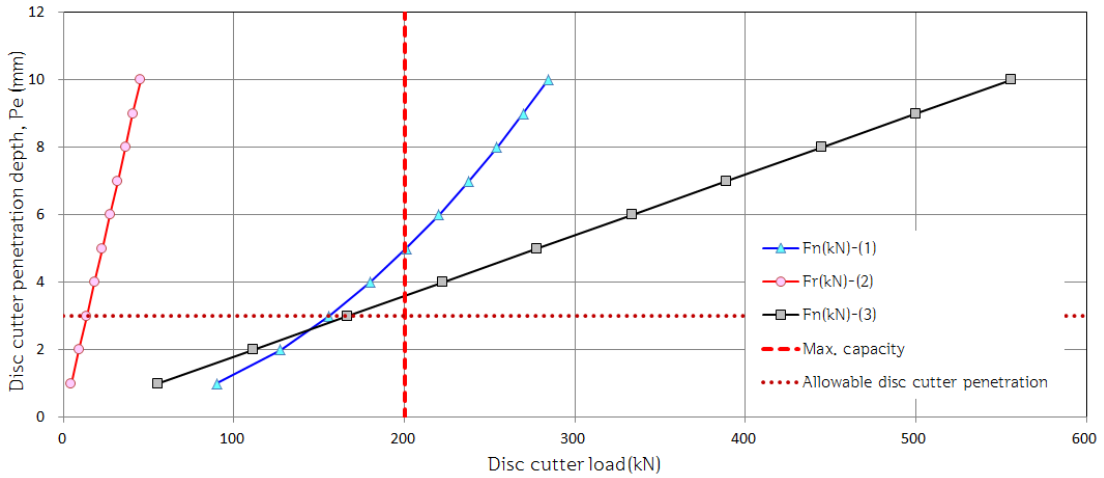


Fig. 3. Disc cutter penetration depth vs. Disc cutter load

대한 자료를 이용하여 15.5인치의 경우에 대하여 추정하였다. 따라서 디스크커터의 최대용량은 200 kN을 적용하였다.

디스크커터의 최대용량 평가는 커터헤드 1회전당 디스크커터 관입깊이(P_e)의 변화에 따른 커터 연직하중(F_n)과 커터 회전하중(F_r)과 같은 두 가지 커터하중으로 예측모델방법을 이용하여 예측할 수 있다.

- Rostami & Ozdemir (1993) 모델

$$F_n = (0.54 \sqrt{S_c} - 2.82) \sqrt{dP_e} \quad (1)$$

$$F_r = F_n \cdot \sqrt{P_e/d} \quad (2)$$

- Movinkel & Johannessen (1986) 모델

$$F_n = 0.3S_c \cdot P_e \quad (3)$$

F_r : 예측불가

여기서 S_c 는 암석의 일축압축강도(MPa)이고, d 는 디스크커터의 직경(mm)이다.

상기 제안된 예측방법에 의하여 디스크 관입깊이에 따른 커터하중을 예측하여 나타내면 Fig. 3과 같다.

상기 분석 결과로부터 본 현장에 투입되는 TBM 장비의 경우 커터 관입깊이(P_e)가 3 mm/rev이하 커터 연직하중이 커터 용량 이내 만족할 수 있을 것으로 판단된다.

TBM 추력용량 평가의 경우 TBM 장비의 소요추력은 다음과 같은 식 (4)에 의하여 계산되어질 수 있다.

$$T_h = \sum_1^N F_n \approx N \cdot F_n \quad (4)$$

여기서 T_h 는 TBM 소요추력(kN)이며, N 은 디스크 커터의 개수, 그리고 F_n 은 커터 연직하중(kN)을 말한다. 디스크커터 관입깊이(P_e)의 상한값 3 mm/rev이하를 근거로 2~3 mm/rev에 대한 TBM 소요추력을 식 (4)를 통해 예측할 수 있다.

디스크커터 연직하중 산정은 안전한 Rostami & Ozdemir (1993) 모델, 식 (1)을 이용하여 커터 관입깊이 2 mm와 3 mm에 대한 연직하중(F_n)은 Table 6과 같이 예측할 수 있다.

상기와 같은 기본적인 평가 결과에 따라 사용된

Table 6. Vertical load of Disc cutter (F_n)

Disc Cutter Penetration Depth, P_e	Cutter Vertical Load F_n (kN)
3 mm/rev	156
2 mm/rev	127

Table 7. Thrust Capacity of Single Shield TBM

TBM	Thrust capacity	No of cutter, N	P_e (mm)	T_h (kN)	Check
Single Shield	11,050 kN	27	3	4,212	O.K
			2	3,429	O.K

Table 8. Disc cutter penetration depth vs. Disc cutter torque capacity

Disc cutter penetration depth, P_e	Disc cutter torque capacity, F_r (kN)
3 mm/rev	14 kN
2 mm/rev	9 kN

Table 9. Torque capacity of Disc cutter

TBM	D (m)	No of cutter, N	Torque capacity	F_r (kN)	P_e (mm)	T_q (kN-m)	Check
Single shield	3.588	27	510 kN-m (51 t-m)	14	3	407	O.K
				9	2	262	O.K

장비에 대한 추력용량은 다음과 같이 추정할 수 있다. 현장 장비 추력용량은 추진잭(13개) 용량으로만 나타낼 수 있다. 따라서 11,050 kN으로 예측할 수 있다. 상기 계산 결과와 식 (4)를 이용하여 사용 장비(Single 쉴드TBM)에 대한 소요추력을 평가 하면 Table 7과 같다.

평가 결과 2~3 mm/rev 이하 조건에서의 소요추력이 추력용량보다 작아 만족되는 것으로 평가되었다.

TBM 토크용량 평가의 경우 TBM 소요토크는 다음과 같은 식 (5)에 의하여 계산되어질 수 있다.

$$T_q = \sum_{i=1}^N F_{ri} R_i \approx 0.3 \cdot D \cdot N \cdot F_r \quad (5)$$

여기서 T_q 는 TBM 소요토크(kN-m)이며, R_i 는 커터 헤드 중심에서 i 번째 디스크커터까지의 반경(m), N 은 디스크커터의 개수, D 는 커터헤드 직경(m), 그리고

F_r 은 커터 회전하중(kN)을 말한다. 상기 Table 7과 같이 디스크커터 관입깊이(P_e)의 상한값 3 mm/rev이하를 근거로 2~3 mm/rev에 대한 TBM 소요추력을 식 (5)를 통해 예측할 수 있다.

디스크커터 회전하중 산정에 있어서는 Rostami & Ozdemir (1993) 모델, 식 (2)을 이용하여 커터 관입깊이 2 mm와 3 mm에 대한 회전하중(F_r)은 Table 8과 같이 산정되어진다.

설계시와 변경 투입된 장비들에 대한 추력용량은 다음과 같이 추정할 수 있다.

설계시 장비(Double 쉴드TBM)의 토크용량은 평균 토크 75 ton-m (최대토크는 110 ton-m) 적용하였으나 사용되는 Single 쉴드TBM 장비의 토크용량은 평균 토크 51 ton-m (최대토크는 125 ton-m) 적용하였다.

상기 계산 결과, 식 (5)를 이용하여 설계시와 사용 장비에 대한 소요토크를 평가하면 Table 9와 같다.

평가 결과 2~3 mm/rev 이하 조건에서의 소요토크

가 사용장비의 토크용량보다 작아 만족되는 것으로 평가되었다.

TBM 동력용량 평가의 경우, TBM 소요토크는 다음과 같은 식 (6)에 의하여 계산되어질 수 있다.

$$HP = \frac{T_q \cdot 2 \cdot \pi \cdot RPM}{60} \quad (6)$$

여기서 HP 는 TBM의 소요동력(kW)이고, T_q 는 TBM 소요토크(kN-m), RPM은 커터헤드 회전속도 (rev/min)를 말한다.

일반적으로 TBM의 토크와 RPM은 반비례 관계를 나타낸다. 그러나 각 장비별 토크-RPM 도표가 제시되어 있지 않은 관계로 RPM 0 - 최대 토크 및 최대 RPM - 최소 토크로부터 선형회귀식을 도출하면 $T_q = 125 - 22.424 \cdot RPM$ 의 관계식을 얻을 수 있다.

또한, 장비별 커터헤드 구동 모터 동력용량은 설계시 장비의 경우 440 kW (110 kW/개 × 4개)이며, 사용 장비 경우 500 HP (kW)로 제작되었다. 상기 계산 결과와 식 (6)를 이용하여 설계시 장비와 사용 장비에 대한 소요토크를 평가 하면 Fig. 4와 같다.

평가 결과 커터헤드 RPM에 따른 소요 동력이 커터헤드 구동동력 용량보다 작아 만족되는 것으로 평가 되었다. 다만, 사용 장비에 있어서 RPM이 4이상일 경우 소요 동력이 부족할 것으로 판단되어 굴착효율

이 저하될 수 있을 것으로 평가되기 때문에 현재 운행 중인 3.3 RPM정도는 작업효율이 가장 좋은 상태를 유지하고 있다고 평가된다.

상기와 같이 TBM 장비별 특성과 현장조건에 따른 적용성 등에 대한 검토 및 분석결과, 사용하고 있는 Single 셴드TBM 장비에 있어서 디스크커터, 추력, 토크, 동력 등의 항목 등에 대하여 용량을 만족하는 것으로 평가되어 현장에 적합한 것으로 판단된다.

5. 현장 디스크커터 관입깊이 분석

상기 관련기준 분석에서 제시된 Table 1과 같이 압축강도에 따른 커터관입깊이, P_c 값을 적용함에 따라 실질적인 현장암반강도가 150 MPa이상인 경우 실질적인 커터관입깊이를 반영할 수 없기 때문에 이에 대한 수정이 필요한 것으로 평가되었다. 따라서 현장에서 채취한 암석시료를 이용하여 얻은 강도를 디스크커터 관입깊이에 대하여 재평가하고 이에 대한 수정을 제안하였다.

Table 1의 제시된 기준에 누락되어 있는 암석의 일축압축강도가 150 MPa 이상인 경우 디스크커터 관입깊이(P_c)에 대하여서는 암석시험 결과로부터 상기 Fig. 5와 같이 회귀분석을 실시하여 현장에서 실질적으로 분포되어 있는 암석강도에서의 디스크커터 관입깊이를 추정할 수 있다.

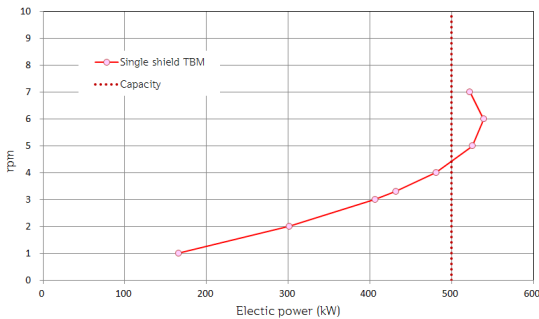


Fig. 4. RPM vs. Electric Power

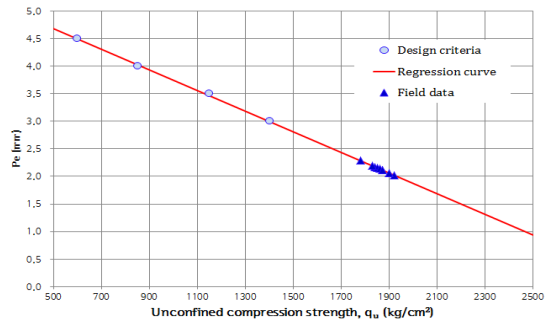


Fig. 5. Unconfined compression strength vs. Disc cutter penetration depth (P_c)



Fig. 6. Field measurement of penetration depth

Fig. 5에서 보여주듯 실질적으로 현 상태의 암석의 경우 디스크커파터 관입깊이는 실질적인 경암의 기준 ($P_e=3.0$ mm)보다 상당히 작은 값으로 나타날 것으로 판단된다.

또한 Fig. 6과 같이 현장에서 조사된 측정위치별 커파터관입깊이 자료와 통계적 분석에 의한 결과와 매우 일치함을 볼 수 있다. 따라서 이러한 경우 설계 디스크커파터 관입깊이는 상기 분석결과와 조사 자료를 근거로 약 2.1 mm 적용하는 것이 타당한 것으로 판단되었다.

6. 현장측정자료 분석

현재 공사현황은 발진 수직구부터 시작하여 약 750 m 굴진 완료된 구간의 날짜별 굴진장, 굴진시간, 조립

시간, 세그먼트 설치링 수 그리고 실작업 이외의 시간을 기록된 자료를 분석해 보면 실질적으로 굴착작업에서 실작업 이외에 추가되는 시간이 많이 소요됨을 알 수 있었다. 특히 버력 처리와 레일설치 등과 같은 추가적으로 요구되는 시간이 많이 소요되었으며 이러한 시간은 굴착작업에 영향을 주었을 것으로 판단되었다. 또한 일축압축강도가 150 MPa 이상구간(이하 “극경암 구간”으로 한다)에 있어서 배출된 버력을 보면 매우 강한 암석으로 구성되어 있음을 알 수 있었다.

굴착현황 자료를 분석하여 노선별 굴진속도 및 강도(설계 및 시공시)를 분석 정리하면 Fig. 7과 같다. 분석한 결과에 의하면 전반부 극경암 구간에 있어서는 0.25 m/hr의 속도로 굴진작업이 진행되었으며 그 이후 구간(압축강도가 120~150 MPa)에서는 0.30 m/hr의 속도로 굴진작업이 현장에서 이루어졌다는 것을 알 수 있다.

7. 작업량 및 공사기간 분석

상기 분석결과를 근거로 설계시와 실질적인 굴착량과 공사기간에 대하여 비교분석하였다. 이 분석에서 작업조건은 설계시 사용된 조건과 동일하게 간주하고, 현장조건에 따라 차이가 있을 수 있는 버력 처리시간 및 부대시설 설치시간 등은 고려하지 않았다. 즉,

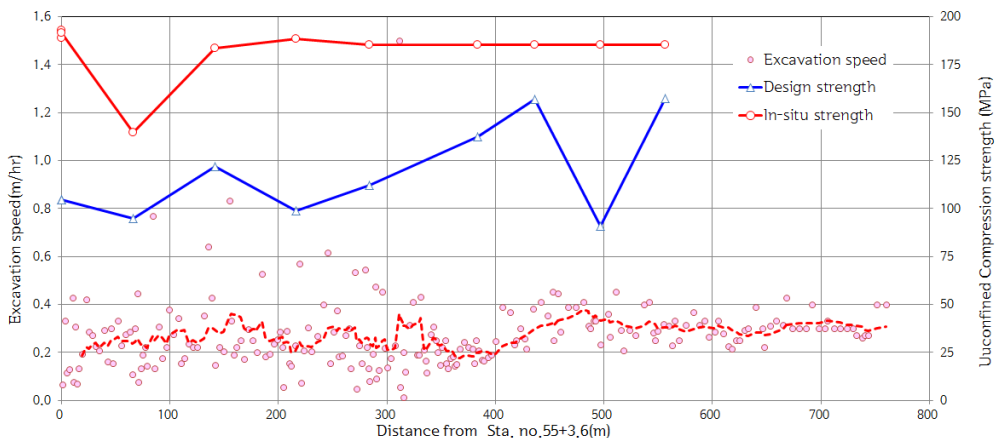


Fig. 7. Excavation speed and unconfined compression strength with tunnel advance

순수 굴진시간만 고려하였다(식 (9)). 이러한 조건에 따라 실질적인 암석강도에 따른 디스크커터 관입깊이 (P_e)를 이용하여 사용 장비의 실질적인 작업량 분석을 실시하고 설계시와 비교 분석하여 실질적인 디스크커터 관입깊이(P_e)를 평가하였다.

작업량계산은 식 (7)을 이용하여 설계시 적용된 디스크커터 관입깊이, $P_e=3.3$ mm와 연구결과 실질적으로 추정되는 2.1 mm에 대하여 비교 분석하였다.

$$Q = \frac{60 \times A \times L_1 \times E}{cm} \quad (7)$$

여기서, Q는 1시간당 작업량(m^3/hr), A는 굴착단면 (m^2), L_1 은 1회의 작업거리(m), E는 작업효율, 그리고 cm은 1회의 사이클 시간(hr)을 말하며 식 (8)을 이용하여 계산될 수 있다.

$$cm = \frac{(t_1 + t_2 + t_3)}{E} + t_4 + t_5 \quad (8)$$

여기서 t_1 은 Stroke 굴진시간(식 (9)), t_2 은 정치시간, t_3 은 세그먼트 조립시간, t_4 은 측량시간, t_5 는 Cutter 교환시간을 말한다.

$$t_1 = \frac{100 \times L_1}{rpm \times P_e} \quad (9)$$

여기서 L_1 은 1회 작업거리이며, RPM은 굴착면의 분당회전속도를 말한다.

이와 같은 작업량 적산방법에 따라 설계시와 사용 TBM 작업량과 서로 비교분석하여, 실질적으로 적용할 디스크커터 관입깊이, P_e 를 평가하였다. 상기 설계시와 사용 TBM 작업량에 대한 검토를 요약 정리하면 Table 10과 같다.

상기 검토결과에 따라 현장에서의 실질적으로 예측되는 작업량은 설계시보다 2.4배 적게 이루어 질 것으로 판단되며, 따라서 설계시보다 실질적인 작업량이 작기 때문에 굴착시간이 설계시 보다 더 소요되는 것으로 나타났다.

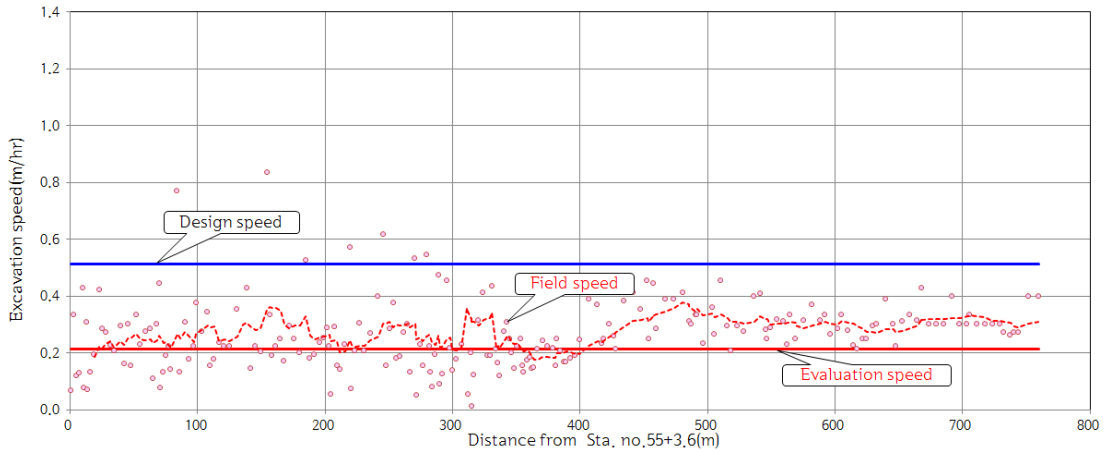


Fig. 8. Comparison of excavation speed with tunnel advance

Table 10. Excavation volume and speed

	Design	Field	Rate
Q (m^3/hr)	5.087	2.118	2.4
V_e (m/hr)	0.514	0.214	

노선 위치별 작업량과 굴진속도를 종합적으로 비교하여 나타내면 Fig. 8과 같다.

상기 결과에 따라 사용 TBM의 예측작업량은 현장 측정값과 근접하는 값을 보여주고 있다. 이러한 결과는 예측작업량의 정확성을 입증해주고 있다고 볼 수 있다. 결과적으로 설계 작업량에 있어서는 실제와 많은 차이를 보여주고 있으며 설계시 적용된 디스크커터 관입깊이 값은 결국 공기지연이 불가피할 것으로 판단된다. 따라서 예측작업량 산정시 적용할 디스크 커터 관입깊이에 대한 검증이 설계단계에서부터 Fig. 6에서 보여주는 것과 같이 실질적인 지반조건을 이용하여 철저한 검토 후 적용값을 선정하여야 할 것이다.

8. 결론

이 연구는 실질적인 현장자료 분석을 통하여 설계시 적용된 TBM 굴진 요소 중 디스크커터의 관입깊이에 대하여 평가하고 향후 적용할 값에 대하여 제시하였다. 이 연구를 위하여 OO전력구공사 TBM 공사구간의 암반구간에 대하여 실질적인 암반상태를 규명하기 위하여 실내 및 현장시험을 실시하고 그 결과를 근거로 암반상태를 분석하였으며 굴착적정성을 검토하였다. 또한 설계시 적용되는 디스크커터 관입깊이에 대하여 평가하고, 현장에 투입된 TBM 장비의 적용성에 대하여 장비에 대한 소요추력과 소요동력 등 용량분석에 대하여 세밀한 검토를 실시하였고, 이를 통하여 쉴드TBM장비의 현장 적용성에 대한 평가 방법도 제시하였다.

이러한 평가결과와 현장 공사자료를 근거로 실제 TBM의 공사량과 굴진속도를 분석하였다. 이 결과로부터 설계시 적용된 TBM의 디스크커터 관입깊이에 대하여 재평가 하였다.

이러한 연구 결과로부터 설계시 적용되는 디스크 커터 관입깊이는 특히 극경암 지반에 있어서 적용값의 변경이 필요하다는 것을 명백히 보여주었다. 또한 암석의 일축압축강도가 150 MPa이상(극경암)인 경

우 3.0 mm 이하로 강도에 따라 감소시켜 적용하는 것이 합리적이라고 제안한다.

감사의 글

본 논문은 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업인 “TBM 핵심 설계·부품기술 및 TBM 터널의 최적 건설기술(과제번호 : 10기술혁신 E09) - 토사지반 커터헤드 설계요소 핵심기술 개발”의 일환으로 작성되었습니다.

참고문헌

1. Gong, Zhao, Jiao. (2005), “Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters.” *Tunnelling and Undergruond Space Technology* 20, pp. 183-191.
2. Graham, P.C. (1976), “Rock exploration for machine manufacturers, in exploration for rock engineering”, In : Bieniawski, Z.T. (Ed.) *Proceedings of the Symposium*, Vol. 1, Johannesburg, Balkema, pp. 173-180.
3. Hood, M., Alehosseine, H. (2000), “A development in rock cutting technology”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 37, pp. 297-305.
4. Hughes, H.M. (1986), “The relative cuttability of coal measures rock.”, *Mining Sci. Technol.* 3, pp. 95-109.
5. Movinkel, T., Johannessen, O. (1986), “Geological parameters for hard rock tunnel boring.”, *Tunnels Tunneling* 4: pp. 45-48.
6. Nelson, P.P., Ingraffea, A.R., O'ROURKE, T.D. (1985), “TBM performance prediction using rock fracture parameter”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol. 22, Issue 3, pp. 189-192.
7. Roby, J., Sandell T., Kocab, J., Lindbergh, L. (2008), “The current state of disc cutter design and development directions”, *Proceedings of 2008 North*

- American Tunnelling Conference. (NAT2008), Society for Mining, Metallurgy & Exploration, pp. 36-45.
8. Rostami, J., Ozdemir, L. (1993), "A new model for performance prediction of hard rock tbms", Proc. of Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC), Boston, USA, pp. 793-809.
9. Korea Electric Power Corporation. (2009) "Guideline of TBM construction cost estimation", KEPCO, pp. 2-131.