

수직구의 상향굴착을 위한 RBM 굴진성능의 분석

Analysis of RBM's Penetration Capacity for Upward reaming of Shaft

이석원¹⁾, Seok-Won Lee, 조만섭²⁾, Man-Sup Cho, 서경원³⁾, Kyoung-Won Seo, 배규진⁴⁾, Gyu-Jin Bae

¹⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원, Senior Researcher, Civil Engineering Div., KICT

²⁾ (주)유니백 토목사업2본부 과장, Manager, Geotechnical & Tunnelling Div., UNIVTEC Corporation

³⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원, Researcher, Civil Engineering Div., KICT

⁴⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 연구위원, Senior Research Fellow, Civil Engineering Div., KICT

SYNOPSIS : Based on the results of prototype air-shaft construction, penetration capacity of RBM(Raise Boring Machine) was analyzed and compared with TBM(Tunnel Boring Machine) performance in this study. Utilization, down time, net penetration rate and advance rate were evaluated and compared. By conducting the laboratory tests for rock properties with the analysis of penetration capacity, relation of penetration capacity and geotechnical parameters was studied. The results showed that much more higher value of utilization, however lower value of net penetration rate for RBM was obtained compared to those of TBM. In addition, as the strength of rock penetrated increased, higher value of net penetration rate was obtained contrarily to the results of TBM performance. Finally, new relationship between total hardness and net penetration rate for weak and weathered rock was derived from these results.

Key words : Shaft, RBM, Penetration capacity, Net penetration rate, Mechanized Tunnelling

1. 서론

국내 철도의 터널내 속도향상 및 300km/h 이상의 고속철도 등에서 발생하는 내부압력을 경감시키기 위한 방법으로 터널 내공단면적의 확대 및 통풍공 설치 등의 방법을 고려할 수 있으나, 내공단면적의 확대는 공사비 및 열차의 노선 변경 등 제약이 많을 것으로 예상된다. 한국건설기술연구원(2000)에서는 철도터널에 통풍공 수직구를 설치할 경우, 열차의 운행지연과 본선 철도터널의 안정성 등을 고려하여 기계화 수직구 굴착방식인 RBM(Raise Boring Machine)공법을 굴착공법(안)으로 제안하였다. 이 공법은 국내 석탄광업소의 환기갱을 굴착하면서 많은 실적을 보유하고 있고, 도로터널의 pilot 수직구 굴착 등 최근 도로, 철도, 양수발전소 등에서 적용사례가 증가하는 추세이다(대한광업진흥공사, 1997).

그러나 RBM공법의 분석자료로서 굴진성능이나 굴착 기술력 등의 실증적인 분석이 체계적으로 연구된 바가 없기 때문에 설계 시 인자들을 가정하거나 혹은 장비 제작사에서 제공하는 외국의 일반적 경험값들을 적용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 수직구 굴착 시 RBM공법의 적용성 증대를 위한 실증적인 기술력 분석을 목적으로 기존 시공사례 분석과 더불어 강원도 도계읍 S광업소에서 연장 98m의 수직구 RBM굴착 현장 시험시공을 수행하였다. 본 논문에서는 시험시공 결과로부터 순관입율(net penetration rate), 굴진율(advance rate), 가동율(utilization) 및 down time 등의 RBM 굴진성능을 분석하였고, 또한 설계 단계에서의 예상 관입율을 산정하기 위하여 지반조사의 결과들을 토대로 가동인자들과의 상관성을

상호 비교·검토하였다.

2. 시험시공 개요 및 지질조건

본 연구의 시험시공을 위한 현장은 해발 445.0m의 강원도 삼척시 도계읍 상덕리에 위치한 (주)경동의 S 광업소에서 수행하였고, 그림 1에 시험시공 현장의 정면도를 나타내었다. 수직구의 상단은 사갱입구로부터 약 270m 하부에 있는 1 level(G.L. 160m)에 위치하며, 하단은 3 level(G.L. 60m)에 위치하고 있다. 따라서 수직구의 거리는 약 100m이며, 순 RBM 리밍 거리는 상부 작업갱과 하부 작업갱의 높이를 제외한 약 90m이다. 본 시험시공에서 사용된 RBM장비는 스웨덴의 Atlas Copco사에서 제작한 83RM-DC type이며, 직경 3.05m의 수직구 단면을 굴착하기 위해서 총 22개의 커터를 장착하였다(그림 2 참조).

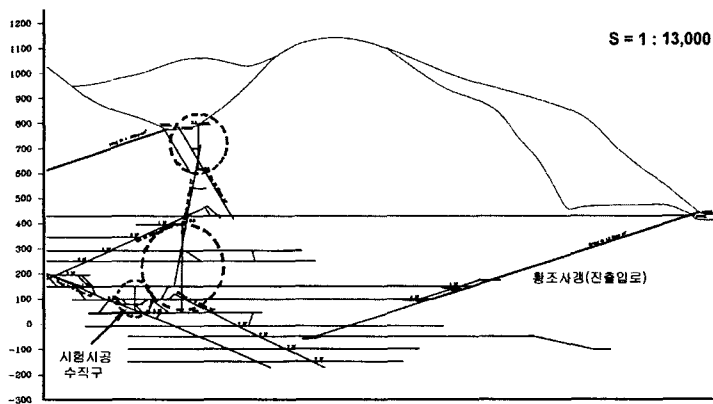


그림 1. 시험시공 현장주변 지형도

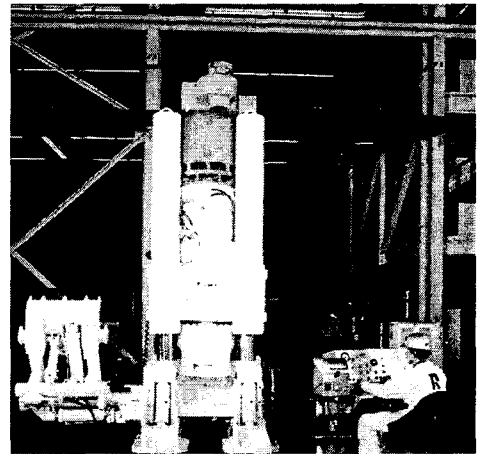


그림 2. RBM(83RM-DC type)

본 연구의 시험시공을 수행한 S 광업소 지역의 지질은 쥐라백악기 신라통의 도계동층과 제4기 충적층으로 구성되어 있으며, 도계동층은 경상계 지층들 중에서 최상위에 속하는 지층으로서 도계동을 중심으로 서남부 일대에 폭넓게 분포하고 있다. 본 시험시공 전구간의 암종은 역암으로서 역암의 기질은 알코스질 또는 응탄질로 갈색 내지 담홍색으로 역(礫)의 입도가 높고 크기가 5cm이내의 것들이다.

3. 수직구 기계화 굴착의 가동인자

3.1 가동율(utilization) 및 down time

기계화 시공의 가동율은 공사기간 중에 RBM이 실제 굴착에 사용된 시간을 나타내는 것으로 RBM의 굴진율을 결정짓는 중요한 요소로서, 본 시험시공과 D터널 수직구 사례에서는 down time과 장비수리, 드릴파이프 교환, 버력처리 등의 작업관련 시간을 제외한 1 stroke(1.52m)당 순 굴삭시간(min)으로 표시하였다. 본 시험시공은 홍점토를 포함하는 역암층에 대하여 8시간/1교대/1일 동안 작업하였고 약 71%의 높은 RBM 가동율을 나타내었으며, D터널의 경우는 비교적 경암반에 속하는 화강암으로서 24시간/3교대/1일 동안 64%의 가동율을 나타내었다. 참고로 국외사례 중 TBM굴착에서의 가동율은 일반적으로 30~50%의 범위를 보이고 있으며, 지반의 종류에 따라 상이한 가동율을 나타내고 있다(한국건설기술연구원, 1993). 이와 같이 RBM굴착이 TBM굴착에 비해 비교적 높은 가동율을 나타내는 이유로는 굴착단면이 직경 3.05m로 소규모이며, 장비의 추진력을 TBM과는 달리 상부에서 얻을 수 있으므로 지반의 조건에 따른 영향이 비교적 적은 것으로 사료된다. 그리고 down time은 공휴일 이외의 다른 작업상 제약이

없었던 것으로 파악되었다. 그리고 down time 이외의 작업 중지사유로는 측량, 유압유 보충, 전등설치, 비트 교환, 모터수리 등으로 작업이 일부 중단된 것으로 파악되었다.

3.2 순관입율(net penetration rate, Pe)

순관입율(Pe)은 RBM의 커터헤드가 1회전하였을 때 암반을 뚫고 들어간 관입 깊이를 나타내며, 일반적으로 mm/rev로 표기한다. 설계 시 Pe의 산정은 일반적으로 커터와 장비의 사양에 따라 이론적으로 구할 수 있으며, 여러 연구자들이 제안한 경험적 산정방식으로도 구할 수 있다. 본 연구의 시험시공 구간은 대표 암석시료의 압축강도 범위가 약 400~500kg/cm²로서 평균 Pe가 2.233mm/rev으로 분석되었고, D터널의 경우 암석시료의 압축강도가 약 1,900kg/cm²이며 평균 Pe는 1.488mm/rev로 조사되었다. 참고로 표 1에는 국내 TBM 설계시 적용한 암석강도별 Pe를 나타내었고, 본 시험시공 및 D터널의 사례가 대체로 낮은 Pe의 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 RBM 장비의 일반적인 굴착능력보다 적은 것으로서 지반의 연·경 정도와 함께 추력(thrust or bit force)의 증가에 따른 과부하 방지 등에 의해 기인된 것으로 사료된다.

표 1. TBM 시공실적에 의한 순관입율(진로건설)

구 분	일축압축강도 (kg/cm ²)	순관입율(mm/rev)	비 고
극경암	1,500 이상	2.3~2.7	
경 암	1,300 ~ 1,500	2.7~3.2	
보통암	1,000 ~ 1,300	3.2~3.8	
연 암	700 ~ 1,000	3.8~4.2	
풍화암	500 ~ 700	4.2~4.7	

3.3 굴진율(advance rate, Ar)

굴진율(Ar)은 RBM의 가동율에 Pe를 곱한 값으로 나타내며 실제 RBM의 굴진성능을 평가하는 지표가 된다. 본 시험시공과 D터널에서는 실제 RBM이 작동하였던 작업시간과 1 stroke(1.52m)를 토대로 Ar을 산출하였고, 단위 시간당 굴착장(m/hr)으로 표기하였다. 본 시험시공에서 구한 평균 Ar은 0.382m/hr이며, D터널에서 구한 평균 Ar은 0.281m/hr로 조사되었다. 참고로 국내 TBM시공사례에서 조사된 Ar은 0.13m/hr~0.83m/hr(평균 0.4m/hr)로서 RBM굴착의 경우가 낮은 경향을 보이고 있다.

4. 수직구 심도별 RBM굴착 설계인자

4.1 암석강도특성

본 연구에서는 RBM의 굴진능력을 분석하기 위하여 수직구의 심도별 일축압축강도(Sc), 압열인장강도(St), schmidt hammer 반발경도(Hr) 시험을 실시하였고, 각각 1개/m 단위로 총 90회의 실험을 수행하였다. 이 결과들은 RBM의 드릴파이프 1본을 기준으로 1.5m씩 구분하였는데, Sc와 St는 2본의 3개 결과 중 해당 구간의 전체적인 연경도를 고려한 후 상·하값 혹은 평균값 등으로 선정하였다. 그리고 Hr은 1m 당 8회의 타격을 통하여 최대, 최소값을 제외한 평균값을 구하였으며 드릴파이프 1본을 기준으로 1.5m씩 구분하여 정리하였고, 이들의 실험결과는 표 2에 간략하게 나타내었다.

표 2. 시험시공 심도별 강도특성실험 결과

Depth(m)	일축압축강도(kg/cm ²)	압열인장강도(kg/cm ²)	반발경도(Hr)	비 고
2.20	522.98	44.87	14.3	
3.72	189.84	33.92	23.5	
:				
25.00	494.44	68.70	23.8	
26.52	283.04	26.44	14.8	취약구간 (수직절리 및 녹점토 분포)
:				
37.22	226.44	31.18	26.8	
38.74	466.88	78.35	26.1	
:				
73.72	424.22	61.19	24.1	
75.24	30.00	10.00	28.0	취약구간 (수직절리 및 절리간격이 매우 좁음)
:				
82.84	110.00	65.00	23.7	
84.36	380.00	50.00	25.1	
85.88	400.00	45.00	26.2	

4.2 합경도(total hardness)

암석의 합경도(H_T) 산출은 schmidt hammer에 의한 반발경도(Hr)와 마모경도(Ha)의 곱으로부터 구할 수 있다. Ha는 Tarkoy가 제안한 마모시험으로부터 구할 수 있는데, taber abraser(modified taber abraser model 5130)를 이용하여 암석시편을 일정한 속도로 회전시키면서 abraser wheel에 의해 마모되는 정도를 측정한다(ASTM, 1996 참조). 본 시험에서는 시추구간 중 대표적으로 역(礫)의 크기 및 점토와 역(礫)의 비율에 따라 표 3에 나타낸 바와 같이 16개 대표시료에 대해 실험을 수행하였다.

표 3. 시추구간의 대표적인 마모경도 실험결과

시료번호	Before(g)	After(g)	Loss(g)	마모경도(Ha)	반발경도(Hr)	합경도(H _T)	비 고
# 1	156.53	156.09	0.44	2.27	13	19.60	녹점-1
# 2	141.62	140.71	0.91	1.10	26.8	28.09	녹점-2
# 3	129.85	129.47	0.38	2.63	13.4	21.74	녹점-20-L
# 4	139.24	138.41	0.83	1.20	16.2	17.78	녹점-20-S
# 5	131.56	131.17	0.39	2.56	22.8	36.51	녹점-80-S
# 6	144.07	143.67	0.4	2.50	25	39.53	신-20-S-1
# 7	151.25	150.77	0.48	2.08	12.7	18.33	신-20-S-2
# 8	135.85	135.63	0.22	4.55	23.8	50.74	신-80-L-1
# 9	137.28	137.09	0.19	5.26	23.4	53.68	신-80-L-2
# 10	141.46	141.26	0.2	5.00	23.5	52.55	신-80-S-1
# 11	138.22	137.98	0.24	4.17	25	51.03	신-80-S-2
# 12	130.63	130.06	0.57	1.75	28	37.09	홍점-1
# 13	144.72	144.05	0.67	1.49	24.2	29.57	홍점-2
# 14	130.17	129.55	0.62	1.61	13.4	17.02	매우취약
# 15	134.58	134.3	0.28	3.57	22	41.58	보통-50-M
# 16	151.18	150.76	0.42	2.38	24.5	37.80	녹점-80-L

이와 같이 시추코어의 Ha와 Hr로부터 약 17~53까지의 H_T를 구할 수 있었으며, 기계화 시공을 적용할 수 있는 암반들의 H_T에 비해 매우 낮은 범위에 속하고 있고, 특히 석영 함유량이 거의 없는 점토층 구간에서 가장 낮은 값을 보이고 있다. 참고로 그림 3에는 taber 마모시험을 수행한 동일 심도에서의 Sc

및 St 와 H_T 의 관계를 그래프로 나타내었고, H_T 가 증가할수록 강도들도 함께 증가하는 (+)의 상관관계를 보이고 있다.

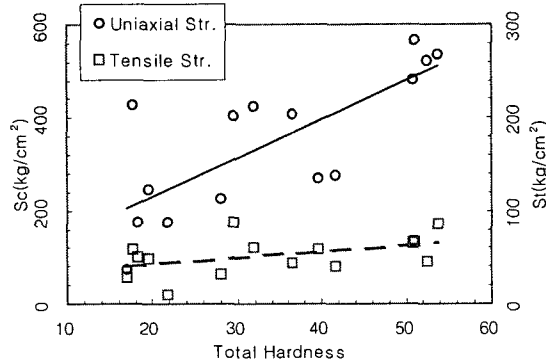


그림 3. 시험시공 구간의 대표암종에 대한 합경도와 Sc , St 의 관계

5. RBM굴착의 순관입율과 설계 인자들의 관계

터널의 기계화 시공을 위한 TBM굴착 및 Shield TBM굴착 등을 위하여 설계단계에서의 예상 Pe 및 Ar 을 추정하는 것은 시공기간 및 공사비 등의 산정을 위하여 매우 중요한 요소이다. 따라서 본 절에서는 수직구의 RBM굴착 시 예상되는 Pe 를 설계단계에서 보다 근사적으로 산출하기 위하여, 실제 시험시공에서 도출한 굴착능력과 수직 시추조사결과로부터 구한 암반의 강도특성들과의 상관성을 규명하여 보았다.

5.1 강도특성과 순관입율과의 상관성

Graham은 TBM의 Pe 에 영향을 주는 요소로 암석의 Sc 와 추력으로 판단하고, 미국 Robbins사의 현장 경험을 토대로 Sc 가 140MPa ~ 200MPa인 경암반에서 시공한 사례들을 대상으로 다음 식 (1)과 같이 제안하였다. 그러나 intact한 시료에 대한 Sc 는 현장특성이 반영되지 못하므로 Pe 를 추정하는데 부적절한 것으로 알려져 있다. 이와 함께 Hughes는 식 (2)와 같이 광산에서 수집한 TBM 시공자료를 토대로 Sc 와 추력, 디스크 직경을 이용한 Pe 산정식을 제안하였다. Farmer와 Glossop의 반경험적 해석식에서는 TBM굴진 시 chip이 암석의 인장파괴로부터 유발된다고 판단하여 압열인장시험에 의한 인장강도로 Pe 예측을 연구하였고, 퇴적암반에서의 자료를 이용하여 다음 식 (3)과 같이 제안하였다. 인장강도는 비교적 연약한 암반에 대하여 적용할 수 있으며, 특히 암석의 취성거동과 이방성을 평가하는데 사용될 수 있다(U.S. Army, 1997).

이와 같이 식 (1)~(3)의 경험적 해석에 의한 Pe 추정에서는 암석의 압축강도 및 인장강도가 증가할수록 Pe 가 감소하는 경향을 알 수 있다. 참고로 한국건설기술연구원(1993)은 국내의 TBM 시공자료들로부터 구한 일축압축강도 및 인장강도와 Ar 과의 관계에서 보통암에서 극경암에 속하는 지반조건에서도 이들의 상관성이 명확하게 나타나지 않은 것으로 제시하였다.

$$Pe = \frac{3940F_n}{\sigma_{cf}} \quad (1)$$

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

$$Pe = \frac{624F_n}{\sigma_{cf}} \quad (3)$$

여기에서, Pe : 순관입율(mm/rev), F_n : bit force(kN), σ_{cf} : 일축압축강도(MPa),

D : 디스크 커터의 직경(mm), σ_{rf} : 암석의 인장강도(MPa)

따라서 본 연구에서는 경험적 해석식들과 시험시공에서의 경향을 상호 비교하기 위하여 표 2에 나타난 심도별 Sc와 St에 대한 Pe를 분석하였고, 그림 4의 (a), (b)에 각각 도시하였다.

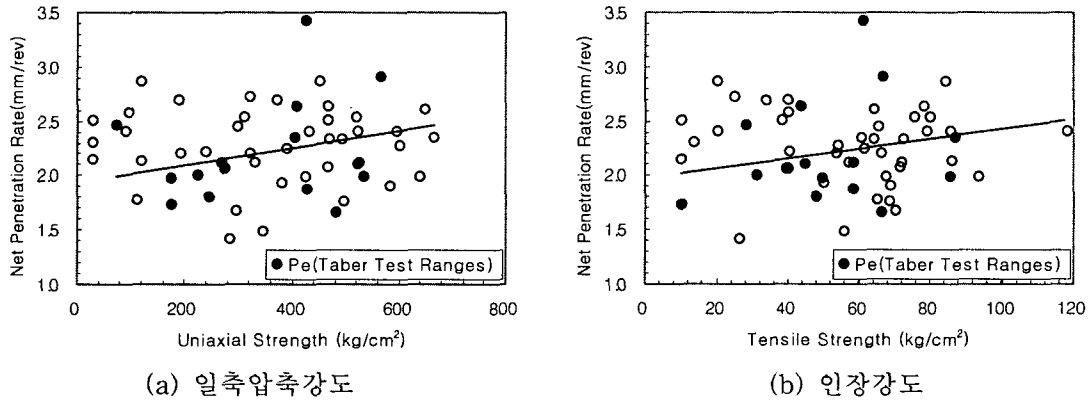


그림 4. 시험시공에서 구한 RBM굴착 시 Pe와 강도특성과의 관계

그림 4에서 볼 수 있듯이 본 시험시공의 수직구 굴착구간 전체를 대상으로 분석한 결과, 암석의 강도 특성과 Pe가 상호 상관성이 거의 없는 것으로 조사되었다. 즉, 시험시공 전구간을 대상으로 분석한 경우는 많은 자료에 의한 객관성은 증대될 수 있으나 자료의 분산이 커짐을 알 수 있었다. 그러나 전체 시추구간 중 대표지반의 특성을 역(礫)의 크기와 풍화정도로 구분하여 분석한 15개 자료(채워진 점)들만 도시한 결과에서는 암석의 강도가 증가할수록 Pe가 증가하는 경향을 보이고 있다.

대표지반에 대한 분석결과는 식 (1)~(3)의 TBM의 Pe 산정식에 의한 결과와 상반되는 경향을 나타내고 있는데, 이러한 경향은 시공기술과 지반조건에 따른 원인으로 추정할 수 있었다. 즉, 본 시험시공 현장의 일축압축강도 범위가 약 $60\text{kg/cm}^2 \sim 660\text{kg/cm}^2$ 로서 연암층으로 구성되어 있기 때문에 장비운영상 안정성을 고려하여 암반이 연약할수록 bit force와 RPM을 저하시켜 작업하였고 이와 함께 Pe도 동반하여 낮아지게 된 것으로 사료된다.

5.2 반발경도와 순관입율과의 상관성

슈미트 햄머에 의한 암반의 반발경도 측정은 현장에서 강도특성을 용이하게 측정할 수 있는 방법으로 일축압축강도와 상관성을 가지고 있는 것으로 알려져 있다. Bamford(1984)는 반발경도, 전추진력(total propel thrust), NCB콘 관입치, 전단저항각도들로부터 결정된 반발경도의 함수로서 관입율을 예측하기 위한 다중선형모델을 유도하였다. Tarkoy(1973)는 반발경도와 마모경도를 이용하여 total hardness(H_T)를 유도하였고, H_T 와 Pe과의 관계를 현장에서 수집한 자료를 이용하여 제시하였다. 한국자원연구소(1999)는 M도수로터널에서의 TBM시공에 따른 순굴진거리와 현장 반발경도값을 상호 비교하였고, 순굴진거리(평균치)가 1.24m/hr에서 0.78m/hr로 저하된 구간에서 반발경도 값(평균치)이 54.9에서 62.0으로 증가하고 있음을 제시하였다.

이와 같이 schmidt hammer에 의한 반발경도는 Pe를 예측하기 위해 여러 가지 인자들과 함께 복합적으로 사용되는 중요인자로서, 본 실내시험에서는 시추코어의 1 stroke(1.52m)에 대하여 8회의 반발경도

를 측정하였다. 그림 5는 시추코어에 대한 반발경도와 Pe와의 관계를 나타낸 그래프로서, 전반적으로 Pe의 예측에 사용되는 중요한 자임에도 불구하고 명확한 상관성이 없는 것으로 분석되었다. 그러나 역(礫)의 크기와 풍화정도로 구분하여 분석한 15개 자료(채워진 점)들만 도시한 결과에서는 반발경도가 증가할수록 Pe가 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 결과는 강도특성과 굴진성능과의 관계에서 이미 언급한 바와 같이 본 시험시공에서는 장비운영 상 안정성을 고려하여 암반이 연약할수록 bit force와 RPM을 저하시켜 작업하였고, 이와 함께 Pe도 동반하여 낮아지게 된 것으로 사료된다.

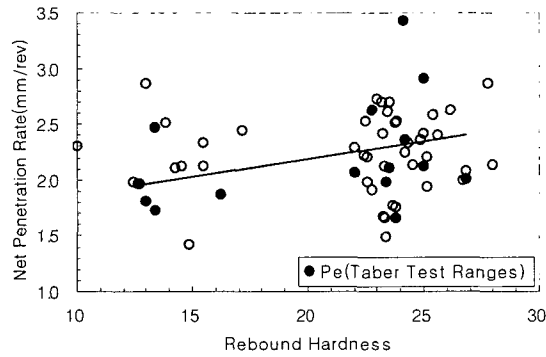


그림 5. 시험시공에서 구한 RBM굴착 시 Pe와 반발경도와의 관계

5.3 암석의 합경도(H_T)와 순관입율과의 상관성

암석의 합경도(H_T)는 TBM의 관입율 및 cutter 소모율과의 상관성이 높은 것으로 알려져 있는데, 본 시험시공에서는 심도별 시추코어의 대표적인 특성을 고려하여 15개 시료에 대한 H_T를 구하였고, 그림 6(a)에는 H_T와 해당 심도에서 구한 Pe를 도시하였다. 그림 6(a)에서 보는 바와 같이 $Pe = 0.0039 \times H_T + 2.07$ 로서 H_T가 증가할수록 Pe가 증가하는 경향을 보이고 있으며, Barton(2000)이 제시한 바와 같이 Q-value가 낮은 구간에서는 지반의 강도가 양호해 질수록 Pe와 Ar이 증가하는 경향과 일치하고 있다. 즉, 이 결과는 그림 6(b)의 경향과 반대의 결과를 나타내고 있는데, 이러한 원인으로서는 본 시험시공에서 구한 H_T 값들이 약 10 ~ 50의 낮은 범위로서 그림 6(b)의 H_T 범위에 포함되지 않았으며, 낮은 범위의 H_T 및 연암 이하의 암석에서는 bit force의 감소가 동반되기 때문에 Pe도 감소되는 것으로 사료된다.

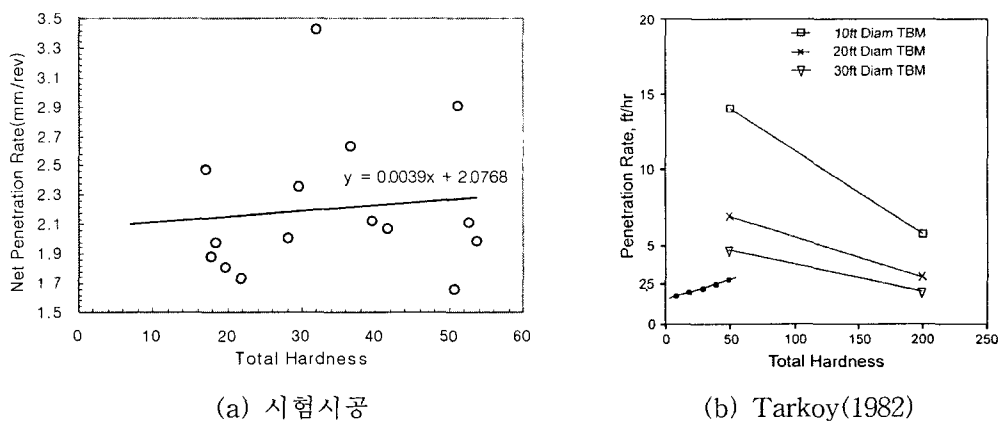


그림 6. RBM 및 TBM굴착 시 Pe와 H_T와의 관계

따라서 본 시험시공에서 구한 H_T와 Pe와의 관계는 (+)상관성을 가지는 것이 적합한 것으로 판단되며,

낮은 암반강도 및 H_T 에서의 Pe 에 대한 자료로서 Tarkoy가 제시한 결과와 더불어 RBM의 특성에 적합한 수정된 관계 도출을 위한 연구가 지속되어야 할 것으로 사료된다.

6. 결론

본 연구에서는 RBM공법을 이용하여 연장 98m 수직구의 시험시공을 수행하였고, 시험시공에 따른 RBM 굴진성능을 분석하여 보았다. 또한 설계 단계에서의 예상 관입율을 산정하기 위하여 지반조사의 결과들을 토대로 가동인자들과의 상관성을 비교·검토하였다. 시험시공으로부터 RBM공법의 굴진성능을 분석한 결과, 가동율은 약 71%로 국내 TBM 시공실적(약 15~30%)에 비하여 매우 높게 나타났으며, 이는 작업공정이 TBM에 비하여 비교적 단순하고 작업자의 숙련도가 매우 높기 때문인 것으로 판단된다. 본 시험시공의 평균 순관입율은 2.233mm/rev으로 분석되어 국내의 TBM 시공실적의 평균 관입율에 비해 약 1/2배로 나타났고, 평균 굴진율도 TBM의 경우에 비해 다소 적은 0.382m/hr로 분석되었다. 이러한 경향은 통상적인 RBM장비의 굴착능력보다 낮은 것이며, 지반의 강도가 연암 및 풍화암 범위로서 수직구 굴착면의 안정성 확보와 추력(thrust or bit force)의 증가에 따른 과부하를 방지하기 위한 작업자의 판단에 기인된 것으로 사료된다. 그리고 RBM 가동 설계인자와 관입율과의 관계에서는 암석의 강도 특성(일축압축강도, 인장강도, 반발경도 등)들이 증가할수록 순관입율이 증가하는 것으로 분석되었고, TBM에 관한 기존의 연구결과와 반대의 경향을 보이고 있다. 함경도와 순관입율과의 관계는 $Pe = 0.0039 \times H_T + 2.07$ 로서 함경도가 증가할수록 순관입율이 증가하고 있다. 이상과 같은 경향은 연암 및 풍화암 지반의 범위 내에서 나타나는 것으로서 N. Barton이 제시한 Q_{TBM} 에 의한 예상 관입율의 경향과 일치하고 있음을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 99산학연연구개발사업과제의 일부로 수행되었으며 건설교통부 및 (주)경동, 대우엔지니어링, 삼보기술단, 한국철도기술공사의 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 대한광업진흥공사 (1997), "광업진흥공사 30년사 : 1967~1997", 대한광업진흥공사, pp. 413~425.
2. 유원건설(주), "TBM공법-카탈로그", 유원건설(주).
3. 한국건설기술연구원 (1993), "지하생활공간개발 요소기술 연구-지반굴착기술분야(I)", 정책연구보고서, pp. 1-4~1-127.
4. 한국건설기술연구원 (2000), "철도터널 내공단면적 저감을 위한 통풍공(Air-Shaft)의 공기역학 설계기술 및 수직구 굴착공법 개발", 99산학연연구개발사업 1차년도 보고서, pp. 119~193.
5. 한국자원연구소 (1999), "밀양댐 도수로 터널의 암반물성 및 TBM굴착 분석연구-최종보고서", 한국자원연구소, pp. 4~69.
6. ASTM (1996), "Standard Test Method for Abrasion Resistance of Dimension stone by the Taber Abraser^{1,2}", ASTM Designation: C 1353-96.
7. Barton, N. (2000), "TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock", A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 3~99.
8. Tarkoy, P. J. (1982), "Practical Geotechnical and Engineering Properties for Tunnel Boring Machine Performance Analysis and Prediction", Transportation research record, pp. 62~77.
9. U.S. Army Corps (1997), "Engineering and Design Tunnels and Shafts in Rock", Engineering Manual 1110-2-2901, pp. C-1~C14.