

TBM 가동률의 특성 및 예측에 관한 연구

박철환, 신중호, 한공창 (한국지질자원연구원)

1. 서론

전단면터널 굴착장비는 1840년대에 설계제작된 벨기에의 Maus Machine 이래로 본격적으로 사용된 지도 60년이 지났으며, 현저하게 발달되었다. 특히 기계 및 금속공학의 발전으로 인하여 대형화를 이루었으며, 전자화되면서 정밀한 굴착을 가능하게 하고 체계화되었다. 이러한 장비의 진보는 굴착속도를 향상시키고 공사기간을 단축시키는데 절대적 역할을 하고 있으며, 궁극적으로 굴착비용을 저감시키는 주요 요인이다.

TBM 굴착에 소요되는 비용은 굴착의 효율성과 공사기간에 크게 좌우되며, 공사기간은 순전히 굴진속도(AR, advance rate)에 의하여 결정될 수 있다. TBM의 굴진속도는 다음 식 (1)과 같이 순굴착속도(PR, net penetration rate)와 가동률(U, machine utilization)으로 정의된다. 순굴착속도는 TBM 장비가 멈추지 않고 계속 가동되는 동안 굴착할 수 있는 속도로 정의되며, 암석과 암반의 특성, 그리고 사용하는 장비의 특성에 의하여 결정되는 크기이다. TBM의 가동률은 전체 공사기간에 대하여 장비가 순수하게 굴착작업만을 수행한 시간의 비로 정의되며 보통 %의 값으로 표현한다. 본 연구는 TBM 가동률의 의미를 해석하고 이를 예측하는 연구들을 언급하고 이들의 장단점에 대하여 검토하고 있다.

$$AR = PR \times U \quad (1)$$

2. TBM의 작업능률

2.1 TBM의 휴지시간

TBM 굴착은 여러 가지 요인으로 인하여 굴착작업이 정지되는데 이를 휴지시간(time loss)이라 하며, 순수하게 굴착을 수행하는 시간(T_b , boring time, net operation time) 외의 모든 작업시간을 뜻한다. 휴지시간은 크게 기계적 요인과 암반구조적 요인, 그리고 작업환경적 요인으로 대별된다. 이러한 휴지시간을 각각 T_A 및 T_B , T_C 라고 명명하며, T_b 외의 모든 작업시간을 이의 순서대로 우선 적용한다. 따라서 전체 작업시간(T_t)은 다음 식 (2)와 같이 정의된다.

$$T_t = T_b + T_A + T_B + T_C \quad (2)$$

2.2 TBM의 가동률

TBM 장비가 갖는 제한적 요소로서 굴착 중에 지속적으로 반복되는 장비의 재설치작업은 대표적인 기계적 요인이며 피할 수 없는 작업이다. 재설치작업에 소요되는 시간을 T_r 으로 정의하며, 숙련공에 의하여 평균 4분 정도로 알려져 있으나 TBM 장비의 특성에 따라 3~7분이 소요된다. 고

심도에서 작업하는 경우에는 과대한 지압에 의하여 jamming이 발생하면 30분이 소요되는 경우도 있다. 따라서 TBM의 가동률(degree of operation)은 굴착작업과 재설치작업을 수행하는 시간의 비를 뜻하며 식 (3)과 같이 정의한다. 이에 반하여 순수한 굴착시간의 비를 순가동률(degree of net operation)이라 하며 식 (4)와 같이 정의한다. 보통의 경우에 가동률과 순가동률은 혼동되어 사용하고 있으며, 앞에서 언급한 U는 순가동률을 의미하는 경우가 많다.

$$\eta_o = T_o / T_t = (T_b + T_r) / T_t \quad (3)$$

$$\eta_n = T_b / T_t \quad (4)$$

그림 1은 총연장 10 km를 1년만에 굴착을 완료한 노르웨이의 Meråker 수로터널에서 기록한 작업부분별 시간비를 도시한 것이다. 이 TBM 굴착 현장은 주간평균 100 시간 작업으로 253 m, 평균 순굴착속도 6.4 m/h를 기록하여 세계적으로 유래를 찾을 수 없을 정도로 높은 굴진속도를 기록하였다. 여기에서 알 수 있듯이 식 (4)의 순가동률은 40.2%이며, 재설치작업을 포함하는 가동률은 51.0%이다.

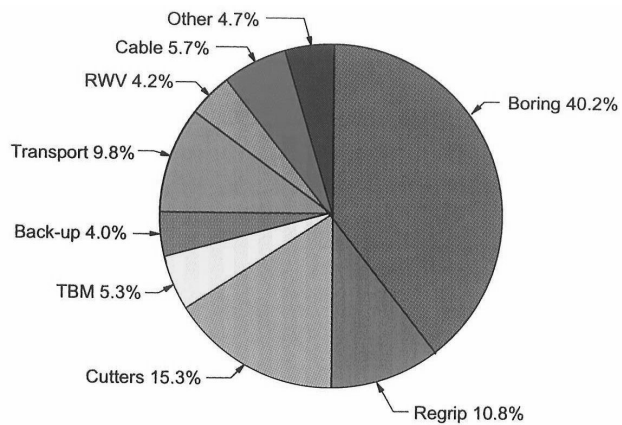


Fig. 1. Time portions in Meråker hydraulic tunnel

2.3 TBM의 활용률

TBM 장비가 갖는 제한적 요소로서 굴착 중에 지속적으로 반복되는 장비의 재설치작업은 대표적인 기계적 요인이며 피할 수 없는 작업이다. 또한 매일 또는 매주 정기적으로 수행되는 커터와 전체 장비의 점검도 대표적인 기계적 요인에 의한 휴지시간을 증대시킨다. 그러나 이러한 점검작업은 오히려 장비의 정지시간을 감소시키는 역할을 하는 필수적인 작업과정이다. 이렇게 TBM 장비를 사용하는 시간의 비율을 나타내는 것을 활용률(η_a , degree of availability)라 정의하며 식 (5)와 같다. 여기에는 커터의 점검 및 교체시간은 포함되며 장비의 보수작업은 포함되지 않는다. 그림 1에서 장비의 활용률은 굴착-재설치-커터-TBM 점검 등의 4가지 작업으로 71.6%라고 할 수 있다.

$$\eta_a = (T_b + T_B - \text{time for machine repair}) / T_t \quad (5)$$

3. 가동률의 변화 속성

앞에서 언급한 바와 같이 장비의 휴지시간은 여러 요인으로 발생한다. 그 가운데 암반에 의한 휴지시간은 어느 정도 예측이 가능하다. 균열이 많거나 연약한 암반에서는 순굴착속도는 높지만, 지보작업이 수행되어야 하므로 휴지시간이 많이 발생한다. 이와는 반대로 암반이 과상이거나 강

도가 높은 경우에는 순굴착속도는 저하되지만, 지보작업은 필요하지 않아 암반요인의 휴지시간은 거의 발생하지 않는다. 이와 같이 암반의 특성에 따라 순굴착속도가 변화하며, 가동률은 이와 반대 방향으로 변화하는 속성이 있다.

이러한 속성을 정성적으로 잘 표현한 것이 그림 1의 Q-TBM이다.(Barton, 1999) 보통 Q도표에서는 Q값이 (매우) 작을 때 (Very) Poor 라고 표현하고 클 때 (Very) Good 이라고 표현하는데 반하여, Q-TBM에서는 값이 증가함에 따라 Poor-Fair-Good 으로 표현되다가, 100 이상에서는 다시 문제를 일으킬 수 있다고 표현한 것이 다른 점이다. 여러 현장자료로부터 얻어진 이 그림에서 Q-TBM 값의 1 정도일 때 PR은 약 5 m/h이며, AR은 1.4~3 m/h로 기록되었으므로 (순)가동률의 크기는 30~60% 정도이다. 그리고 이 값이 1 이상일 때에도 가동률의 크기는 30~60% 정도로 나타났다. 그러나 0.1 정도에서는 PR은 8 m/h 정도이지만 가동률은 5~20%로 크게 저하됨을 알 수 있다. 이는 지반의 불안정에 의하여 발생한다고 도표에 언급되어 있다. 이로서 가동률은 PR의 크기와 반비례하는 경향이 있음을 알 수 있다.

한편 Barton은 AR과 PR의 관계에서 U의 크기를 공사기간의 함수로 정의하고, 이를 다음 식 (6) 과 같이 표현하였다. 이 때, 지수 m의 크기는 Q값에 따라 변화하는 정수라고 설명하였다. 그러나 그림 2나 식 (6)은 가동률을 예측하여 TBM에 의한 설계에 반영할 수 있는 정량적 해석으로 받아들릴 수 없다고 판단된다. 즉, Q-TBM 값이 1 또는 그 이상일 때, 가동률은 30~60%라고 설명하고 있으므로 설계에 반영할 수 있는 예측값으로는 범위가 매우 크다. 또한, 식 (6)에서 T의 크기가 1 시간, 10 시간, 1 주일 정도에서는 어느 정도 수용할 수 있는 크기이지만 수개월 또는 수년동안 지속되는 현장에서는 잘 일치하지 않는 것으로 판단된다. 따라서 Q-TBM에서 제안된 PR 및 AR, U는 본문에서도 언급되었지만 보완이 많이 필요한 크기이므로, 이들 특성을 정성적으로 설명한 자료라고 판단된다.

$$U = T^m \tag{6}$$

(m=-0.21 where Poor Rock, -0.19 /Fair Rock, -0.17 /Good Rock)

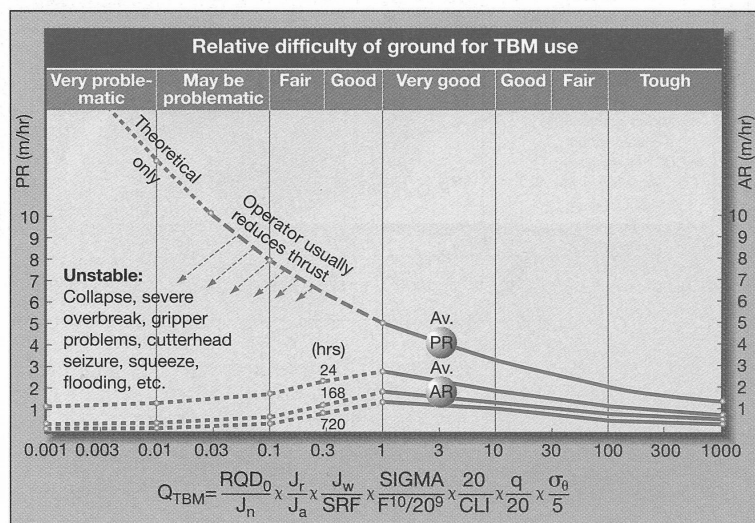


Fig. 2. Chart of Q-TBM (after Barton, 1999)

4. TBM 가동률의 예측

전단면터널의 굴착에서 장비와 운영기술이 현저히 발전되었으며 순굴착속도와 가동률의 예측 연구도 제시되고 있다. 그러나 순굴착속도와는 달리 가동률의 변화에는 앞에서 언급한 여러 가지의 휴지요인으로 많은 변수가 존재하여 예측이 매우 어려운 실정이다. 순굴착속도를 예측하는 연구를 수행하는 대표적인 기관인 노르웨이의 NTNU와 미국의 CSM에서도 이러한 예측모델을 제시하고 있다. 또한 암반조건에 따라 가동률이 변화하는 실적을 바탕으로 퍼지이론을 적용한 연구(김태홍 등, 2004)도 앞으로의 연구방향을 제시하는 시도라고 평가될 수 있다.

텍사스 오스틴대학의 Nelson 교수(1994년)는 가동률의 크기가 40% 이하인 경우에는 효율적인 굴착이 이루어지지 않았다고 주장하였으며, 우리나라의 표준품셈(1991년)에서는 암반에 따라 0.55~0.75로 기준을 제시한 바 있다. 그러나 국내의 실적으로 미루어 볼 때 40%를 달성한 경우는 밀양댐(박철환, 2000년)이 유일하며, 25~38%에 불과하다. 그림 1의 Meråker 수로터널에서도 높은 PR과 AR을 기록했음에도 가동률은 40.2%로 기록되어 Nelson 교수나 토목표준품셈에서 언급한 가동률의 크기는 현실성이 없다고 판단된다.

4.1 장비에 의한 가동률 예측

일본에서는 암반조건과 장비의 종류에 따라 가동률을 제시하고 있는데 그림 3과 같다.(고규준과 김형태, 2000년) 여기에서 세로축에 표시된 효율을 가동률이 아닌 식 (5)의 활용률이라면 현실적인 크기라고 판단된다. 특히 실드 TBM에서는 세그먼트 지보설치 시간을 포함한 활용률은 수용할 만한 크기이다. 많은 현장자료의 분석을 통하여 그림 3과 같은 암반평가와 장비종류에 의한 활용률이나 가동률의 예측은 향후의 과제라고 생각된다.

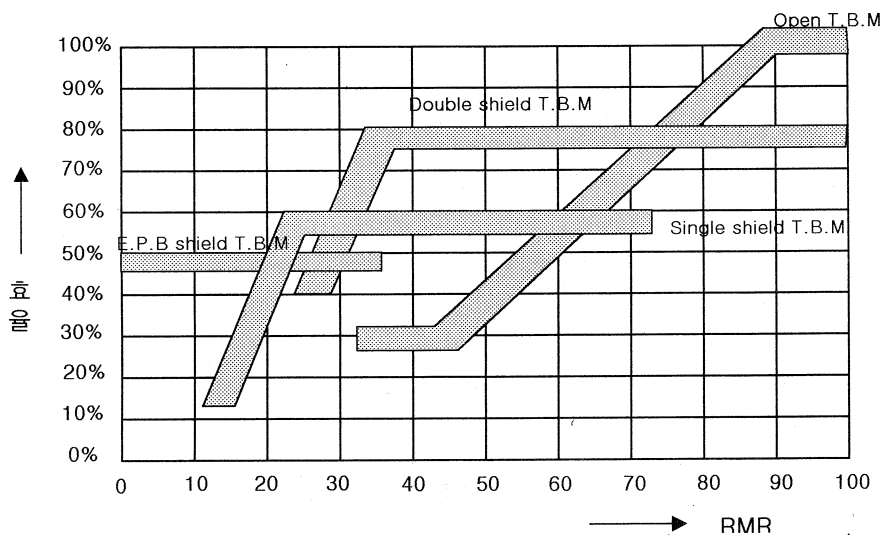


Fig. 3. Degree of availability on RMR and machine type

미국 CSM에서는 현장자료를 분석하여 기계적 요인에 의한 휴지시간을 예측할 수 있는 식 (7)

을 제시하였다. 여기에서 T_m 은 예기치 못한 장비의 수리를 제외한 일상적인 재설치작업, 커터 및 장비의 점검과 통상적인 수리시간을 뜻하며, 순굴착에 소요되는 시간의 0.324배 만큼 소요됨을 의미한다. 그리고 굴착초기에는 이 시간이 약 3배 정도 증가하여 순굴착의 1배정도 소요된다고 제시하였다. 따라서 T_m 은 식 (5)에서 제시한 T_B 로 해석될 수 있어 굴착작업이 원활하게 수행되는 경우에는 TBM의 활용률은 가동률의 1.324배 정도라고 예측된다.

$$T_m = 0.324 / PR \quad (7)$$

4.2 순굴착속도와와의 상관관계

앞에서 언급하였듯이 가동률은 순굴착속도와 반비례하는 경향이 있다. 그러나 그 경향을 정량적으로 제시하기에는 자료의 수가 부족한 실정이다. 그림 4는 밀양댐의 수로터널(그림의 왼쪽 자료, 월간평균)와 노르웨이 Meråker 수로터널에서 얻어진 주간평균의 PR과 U의 관계곡선이다.

연암에서 경암까지 존재하는 Meråker 터널에서 가동률은 PR의 크기에 관계없이 28~53%를 보이고 있어 상관관계를 얻기 힘들다. 그러나, 경암과 극경암에 굴착된 밀양댐에서는 상관관계가 0.59로 이들이 서로 반비례하고 있음을 잘 보여주고 있다.

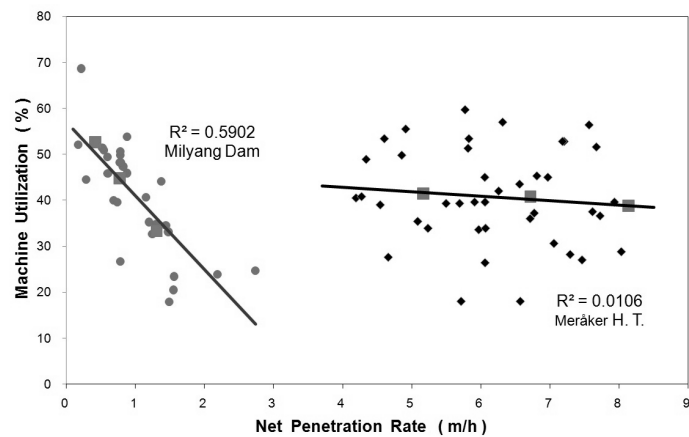


Fig. 4. Relations between PR and U in 2 hydraulic tunnels

그림 5는 앞 그림의 밀양댐을 포함하여 죽령터널과 배후령터널 등 국내에서 분석된 3개의 터널현장에서 얻어진 자료들에 의한 PR과 U의 관계곡선이다. 굴착자료로부터 주간평균을 산출하여 점으로 표시하였으며, 사각형의 큰 점들은 암반등급에 의한 구간별 평균자료이다. 연암을 비롯하여 보통암, 경암, 극경암이 분포된 3개의 터널에서 PR과 U는 미약하지만 반비례하는 경향을 보이고 있다.

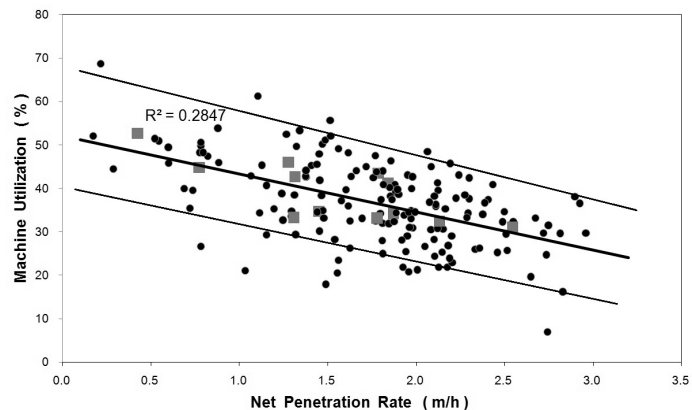


Fig. 5. Relations between PR and U in 3 tunnels in Korea

그리고 Meråker 터널에서와 달리, 최대 및 최소값들도 평균크기보다 약 15% 범위에서 반비례하는 경향이 있다. 이러한 현장자료는 국내 TBM터널의 설계에 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결 론

전단면터널의 굴착장비의 발전에도 불구하고 순굴착속도와 가동률의 예측은 현실적으로 어려운 실정이다. 이에 따라 TBM에 의한 터널설계가 용이하지 않아 사용에 제한을 받기도 한다. 본 연구는 TBM 터널의 설계에 필요한 가동률에 대한 정의와 속성을 설명하였다. 그리고 가동률을 예측하기 위한 현장자료들을 분석하였다. 가동률이 자세히 분석된 국내의 3개 현장자료에 의하면, 가동률은 대체로 순굴착속도에 반비례하는 경향을 갖고 있는 것으로 확인되었다. 이때 가동률의 크기는 $\pm 15\%$ 정도의 오차로 예측이 가능할 것이다.

참 고 문 헌

1. 고규준과 김형태, 2000, 암반터널 전단면굴착 복공공법, 제1차 터널 기계화 시공기술 심포지움 논문집, 한국터널공학회
2. 김태홍과 이완재, 2004, Methods for the prediction of hard TBM utilization level considering rock mass properties, 제5차 터널 기계화 시공기술 심포지움 논문집, 한국터널공학회
3. 박철환 외; 1999, 밀양댐 도수로 터널의 암반물성 및 TBM 굴착속도 분석연구, 한국자원연구소 연구보고서
4. 박철환, 2007, 기계굴착에서 장비의 가동률 분석연구, 제8차 터널 기계화 시공기술 심포지움 논문집, 한국터널공학회
5. 박철환 외, 2011, 배후령터널의 지질과 TBM 굴착요소, 한국암반공학회 춘계학술발표회 논문집, 한국암반공학회
6. 코오롱건설(주)과 (주)한양, 1998, 중앙고속도로 죽령터널 TBM공사 시공보고서
7. Barton N., 1999, TBM performance estimation in rock, Tunnels and Tunnelling International
8. Johannessen S. and O. Askilsrud, 1993, Meråker Hydro-Tunnelling - the Norwegian way, Proc. RETC 1993
9. NTNU, 1994, Hard rock tunnel boring, Project Report 1-94