

죽령터널에서의 TBM 굴착속도 및 커터수명 평가연구

박철환^{1)*}, 신중호¹⁾, 박연준²⁾, 전석원³⁾, 안형준⁴⁾

Evaluation of Penetration Rate and Cutter Life of TBM in Jook-Ryung Tunnel

Chul-Whan Park, Joong-Ho Synn, Yeon-Jun Park, Seok-Won Jeon and Hyung-Jun An

Abstract Jook-Ryung roadway tunnel was constructed by drill-blast after pilot tunnelling by 2 TBMs. This report analyzes the data for TBM performance in the total length of 7.3 km for the two pilot tunnels. Net penetration rates were recorded as high as 2.3 m/h and 2.0 m/h for the two different directions while degrees of operation were 31.4% and 33.3%, respectively. The cutter lives for No.2 tunnel were evaluated 200~280 m³/c and around 400 m/set as high as for Meråker 10 km tunnel in Norway. The relationship between net penetration rate and characteristics of rock mass which were obtained by RMR and TSP measurement, coincides with the prior studies. This kind of evaluation is expected to be used to design TBM tunnelling and to help to perform the TBM operation effectively

KeyWords Jook-Ryung tunnel, TBM, Net penetration rate, Cutter life, Characteristics of rock mass

초 록 중앙고속도로의 죽령터널에서 상하행선 두개의 터널은 발파에 의한 굴착에 앞서 전단면터널 굴착장비로 선행 굴착되었다. 두 대의 TBM 시공은 약 1년간 수행되었으며 총 연장은 7.3 km이다. 상하행선에서 순굴착속도는 각각 2.3 m/h 및 2.0 m/h 으로 분석되었으며, 가동률은 각각 31.4% 및 33.3%로 분석되었다. 하행선에서 커터의 부피수명은 200~280 m³/c이고, 길이수명은 약 400 m/set로 평가되었는데 이는 노르웨이의 메로케르 수로터널현장에서 얻어진 크기와 유사하다. 지보설계 및 TSP 측정을 통하여 얻어진 현지 암반특성에서 경암일수록 순굴착속도가 작아지는데 이는 과거의 여러 연구에서 분석된 경향과 같다. 이러한 평가연구는 TBM 굴착의 계획과 시공단계에서 원활한 굴착작업을 수행하는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심어 죽령터널, 전단면터널 굴착장비, 순굴착속도, 커터의 수명, 현지암반특성

1. 서 론

암반내 터널을 굴착할 때 TBM에 의한 굴착이 증대되고 있는데, 특히 수로터널에 많이 적용되고 있다(Hansen, 1998). 최근에는 장비개발의 기술이 증진되어 대구경의 경암용 TBM이 제작되어 다양한 방면에 활용되고 있다. 우리나라에서도 수로터널을 굴착하기 위하여 TBM장비의 도입이 시작되었지만, 도로 및 철도 등

의 교통용 암반터널의 굴착에 아직까지 대구경 장비가 적용되지 않는 실정이다. 1992년도에 완공된 남산1호 터널의 두 번째 터널은 직경 4.5 m의 TBM으로 선진 굴착한 다음에 직경 11.3 m의 확대굴착기(TBE)를 사용한 것이 그나마 유사한 유일한 사례이다. 이때 발파 공법을 사용하지 않은 것은 도심지 환경 뿐만 아니라 기존 터널과의 이격거리가 매우 작기 때문이다(박철환과 김길수, 1992).

중앙고속도로 건설구간에서 1998년에 굴착이 완료된 죽령터널은 상하행선 두개의 터널로 각각 굴착되었는데, 각 터널의 연장은 약 4.5 km이며 총 공사기간은 6년 이상이었다. 이 터널들은 각각 2차선으로 폭원이 10.7 m인데 발파에 의한 굴착에 앞서, 2대의 TBM으로 선행 굴착되었다(코오롱건설, 1998). 이러한 공법

¹⁾ 한국지질자원연구원 책임연구원

²⁾ 수원대학교 토목공학과 부교수

³⁾ 서울대학교 지구시스템공학과 부교수

⁴⁾ 코오롱건설(주) 건설연구소 연구원

* 교신저자 : cwpark@kigam.re.kr

접수일 : 2005년 9월 7일

심사 완료일 : 2005년 10월 6일

의 시도는 경제적 측면에 의한 것으로 남산1호 터널의 경우와는 다르므로 주목할 만하다.

본 연구는 1997년부터 약 1년간 수행된 죽령터널의 TBM 굴착공사에서 얻어진 각종 굴착기록으로부터 순굴착속도와 기동률, 커터소모량 등을 공학적으로 분석한 것이다. 이러한 공학적 분석결과를 외국의 사례와 비교하여 평가하였다. 이러한 연구분석은 앞으로 암반 내 장대터널을 굴착할 때 암반용 TBM을 이용한 선진 굴착이나 대구경 장비를 적용하는데 유용하게 사용될 수 있을 것이라 판단된다.

2. 지질개요

죽령터널은 충북 단양과 경북 풍기 사이에 위치하며 북동방향으로 발달한 소백산맥을 가로지르는 S70E 방향으로 굴착되었다(코오롱건설, 1998). 이 구역에는 죽령대단층의 영향을 받은 단층들이 발견되었는데, 노선의 방향과 평행한 방향 및 거의 수직인 N45E 방향을 갖고 있다. 이들 단층은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 시점부에서는 상행선에서 먼저 나타나다가 종점부에서는 하행선에서 선행하고 있다. 이 지역 부근에는 약 1400 m 높이의 준봉들이 있으며, 터널의 해발고도는 약 400 m 이고 최대 산고는 약 850 m이다. 따라서 본 터널의 최대 심도는 약 450 m 이며, 심도가 300 m 이상인 구간은 약 1.3 km에 이른다.

죽령터널에 분포하는 기반암은 선캄브리아기로 추정되는 소백산 편마암 복합체에 속하는데 변성작용의 양상에 따라 흑운모 화강암질 편마암과 미그마타이트 편마암, 함석류석 화강암질 편마암으로 대별된다. 터널굴착에서는 앞의 두가지 편마암이 두 번씩 교차되어 나타

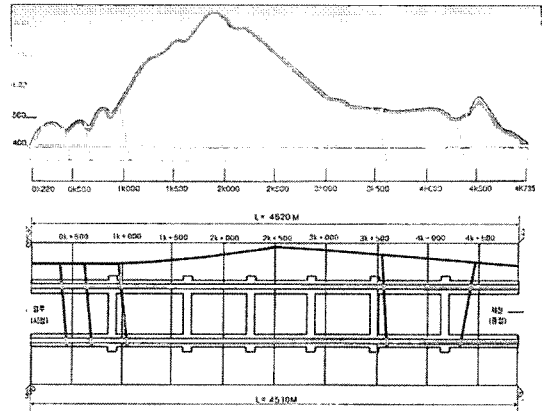


Fig. 1. Sectional and planar maps along the tunnel

났고, 이 기반암 상부를 시점부는 하상의 영향으로 층적층이 일부 발견되었고, 종점부는 셰일이나 석회암이 존재하는 퇴적층이 포함되어 있는 것으로 확인되었다.

지질조사 단계에서 9개의 터널부 시추공 시료에 대한 일축압축 및 삼축압축, 인장 등의 강도시험을 수행하여 얻은 결과는 Table 1과 같다(한국도로공사, 1996). 일축 압축강도의 크기로 미루어 기반암인 편마암은 보통암으로 판단되며, RMR의 크기로 미루어 전반적으로 보통보다 약한 암반으로 판명되었다. 그러나 터널굴착 후에 지보의 타설에서는 RMR의 다섯 등급이 균등하게 분포된 것으로 확인되었다.

TBM 시공의 총연장은 7.3 km인데, 상행선은 3,644 m 연장으로 직경 4.5 m로 약 11개월 동안 수행되었으며, 하행선은 3,664 m 연장으로 직경 5.0 m로 약 10개월 동안 수행되었다. TBM 시공의 시점은 상행선에서

Table 1. Mechanical properties of rocks in tunnel depth

Hole No.	Sp. Gr.	Wave Velocity (km/sec)		UCS (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)	Cohesion (MPa)	Internal Friction Angle(°)	RMR Class
		P wave	S wave						
1	2.81	5.48	3.08	134	55.3	7.2	13.0	61	3
2	2.73	4.73	2.63	92	52.6	6.7	11.0	57	3
3	2.75	4.78	2.66	99	29.6	11.8	17.0	52	3
4	2.66	5.03	2.87	112	45.0	8.2	13.0	57	3
5	2.61	5.14	2.89	131	42.9	13.4	21.0	54	3
6	2.64	3.63	2.04	33	17.5	2.0	3.0	53	5
7	2.68	4.67	2.69	57	21.1	4.2	6.0	53	4
8	2.76	4.84	2.78	136	66.7	8.2	15.0	61	3
9	2.60	2.54	1.42	15	16.0	1.5	1.7	42	5

Sta. 0K+302, 하행선에서 Sta. 0K+312 지점이며 Sta. 4K 부근에서 NATM 터널과 연결된다(Fig. 1 참조).

3. 굴착성능 평가

3.1. 일평균 굴착장

죽령터널 상행선의 TBM 굴착은 1997년 9월에 시작하여 1998년 7월에 종료되어 약 11개월, 319일 동안 수행되었다. 그러나 중간에 대규모의 장비점검을 수행하였으며 추석 및 설날 연휴를 제외하면 219일간 굴착되었다. 반면 11월에 시작한 하행선은 7일간의 설날 연휴 외에는 장기의 휴지기간이 없이 214일간 굴착되었다. 따라서, 장기간의 연휴를 제외하고 휴일인 일요일이 포함된 전체 작업일에 대한 일일굴진장의 평균은 17.2 m 및 16.6 m 이다. 이러한 TBM 시공에서 얻어진 굴착자료의 전체 개요는 Table 2에서와 같은데, 그림이나 표에서 상하행선을 각각 No.1 및 No.2 Tunnel로 표기하였다.

이 기간동안 TBM이 가동되어 굴착작업을 수행한 시간은 상하행선에서 각각 1575 시간 및 1816 시간이다. 따라서 가동률은 31.4% 및 33.3%이며, 순굴착속도는 2.3 m/h 및 2.0 m/h이다. 일일굴착량이나 순굴착속도를 비교해 볼 때 상행선에서의 값이 하행선에서의 값보다 크므로 상행선에서 보다 원활한 굴착을 수행한 것 같지만, 상하행선에서의 굴착 직경이 서로 다르므로 부피의 굴착량으로 비교할 때는 하행선에서 보다 원활한 작업이 이루어졌음을 알 수 있다. 이는 가동률에서 약간의 차이를 보일 뿐 만 아니라 하행선에서는 상행선에서와 같은 대규모 정비기간이 없었다는 것으로부터 알 수 있다.

상하행선에서 일일 굴착량의 최대값은 평균 굴착량의 2~2.5배인 40.5 m 및 33.9 m에 이른다. 일일 굴착량의

최소값은 큰 의미를 갖지 않지만 이러한 최대값은 작업이 원활한 경우 굴착 가능한 크기인 것이다. Fig. 2는 4 m 간격의 일일굴진장에 대한 작업일수를 막대그림으로 표시한 것이다. 상행선에서는 40일 기록한 8 m (6~10 m 범위)가 최빈값이며, 전반적으로 정상분포라기보다는 8 m부터 24 m를 기록한 날들이 고르게 많이 분포하였다. 하행선에서의 최빈값은 전체 굴진일수의 27%에 달하는 59일이 기록된 20 m인데 이는 평균값과 매우 비슷한 크기이다. 또한 이 최빈값의 일수가 특별히 큰 것을 예외로 하면 전반적으로 정상분포에 가깝다고 볼 수 있으며 상행선과는 다른 양상이다. 두 터널에서 빈도가 비교적 큰 일일 굴착량의 최소값은 다같이 6 m이다. 이로서 6 m 이하의 굴착은 여러 이유에 기인한 것이지만 효율적인 굴착작업이 이루어졌다고 볼 수 없다.

Fig. 3은 하행선에서 일일단위의 순굴착속도(단위는 m/h) 및 가동률(단위는 10%)의 크기를 일일 굴착량에 대하여 도시한 것이다. 가동률은 TBM 가동시간과 거의 같은 개념이므로 가동률이 증가하면 굴착량도 증가

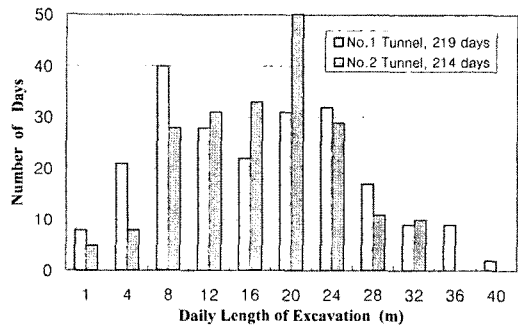


Fig. 2. Histogram of daily length of TBM advance

Table 2. Resultant data of TBM performance for the two tunnels

	No.1 Tunnel	No.2 Tunnel
Diameter of TBM cutterhead (m)	4.5	5.0
Diameter of cutter (mm)	406 (16 inch)	406 (16 inch)
Number of cutter	31	35
Total length of TBM excavation (m)	3644	3664
Length of daily advance (m)	avr. 17.2 max. 40.5	avr. 16.6 max. 33.9
Length of weekly advance (m)	avr. 95.4 max. 155	avr. 91.1 max. 144
Net penetration rate (m/h)	2.30	2.01
Degree of operation (%)	31.4	33.3

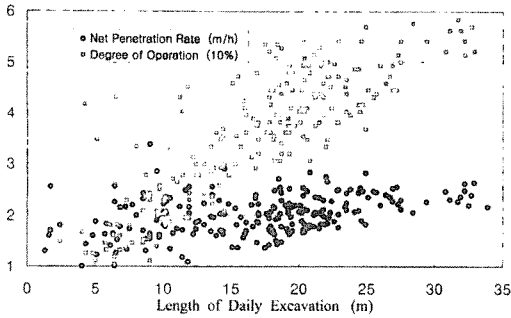


Fig. 3. Relations of daily data

하는데 그림에서도 이의 경향은 뚜렷하다. 이들은 서로 직선적으로 증가관계에 있는데 이때 상관도인 R2는 0.85이다.

순굴착속도는 굴착량에 대하여 이론적으로는 무관한 관계에 있으며, 그림에서도 거의 무관한 관계를 보이면서 일정한 속도의 폭으로 분산되어 있다. 다만 굴진시간에 의하여 굴착량이 20 m 이상으로 큰 구간에서는 그 속도의 변화 폭이 작으며 상대적으로 높은 순굴착속도를 보이고 있는 것은 주목할 필요가 있다. 이러한 경우 순굴착속도의 최소 크기는 전체 평균인 2 m/h 수준으로 평가된다. 즉, 작업조건이 양호하여 가동률이 높은 경우에는 순굴착속도는 일정하게 유지되어, 일반적인 지반조건에서 작업조건은 TBM의 효율적 굴착에 큰 영향요소인 것으로 판단된다.

3.2. 주간평균 굴착장

일일 굴착량의 크기는 매일 매일 변화가 심한데, 특히 암반특성이 변화하지 않는 인접한 구간에서도 그 변화가 심하여 이를 분석하기에는 매우 복잡할 뿐 만 아니라 큰 의미를 찾기 어렵다. 따라서 굴착량이나 순굴착속도의 변화는 주간 또는 10일, 월간 등의 단위로 묶어서 분석하는 것이 중요하다. 본 터널공사는 매우 규칙적으로 일요일에는 작업을 하지 않았으므로 주간 단위로 분석하는 것이 유용할 것이다. 작업이 수행된 주간은 상하행선에서 각각 38주 및 40주이다.

Fig. 4는 주간 단위의 굴착량 크기(단위는 m)를 도시한 것인데 이때 가로축은 누진 굴진장을 뜻한다. 주간 굴착량의 최소 및 최대 크기는 굴진 초기의 자료를 제외하면 상행선에서 66 m 및 155 m이며, 하행선에서는 59 m 및 144 m이다. 상행선에서의 이 값들은 하행선에 비하여 약간 큰 값으로, 비록 상행선에서 원활하지 못한 작업이 이루어졌음에도 불구하고 직경이 10% 작기 때문에 나타난 결과이다.

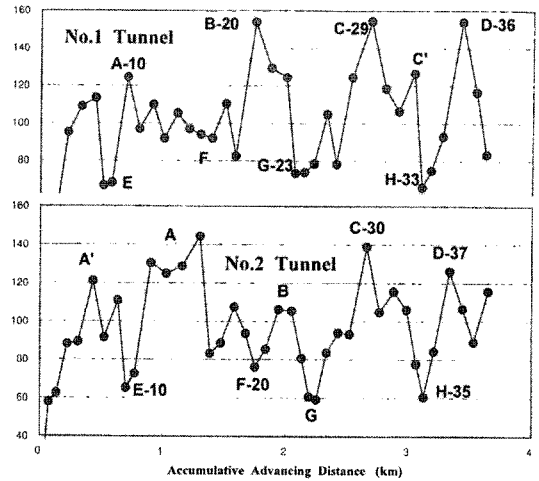


Fig. 4. Weekly length of excavation along accumulative advancing distance

상행선에서 굴착량 변화는 대략 4번의 최고점(upper peak)을 보이며 또한 4번의 최저점(lower peak)을 보이는 양상이다. 이들 꼭지점들을 Fig. 4에서 보는 바와 같이 A부터 H로 표기하였으며, 하행선에서도 같은 경향을 보인다. 이렇게 표시한 최고 및 최저 꼭지점들이 상행선과 하행선에서 서로 비슷한 위치에서 나타나는 것은 지반의 특성 변화를 잘 설명하고 있다고 해석된다. 본 터널의 굴착공사에서 지질이나 지반의 특성자료는 축적되어 있지 않아 이들과의 관계를 상세히 밝힐 수는 없지만 주간 굴착량의 변화로 미루어 굴착에 관련한 지반특성은 8번 정도 크게 변화함을 알 수 있다.

주간 굴착량의 최저점은 E-F-G-H로 표시되어 있는데 굴착량의 크기는 상하행선에서 다같이 60~80 m 정도이다. 이들 4지역의 대략적 위치(단위는 km)는 상행선에서 0.6 및 1.6, 2.1, 3.1이며, 하행선에서는 0.7 및 1.7, 2.2, 3.1이다. 이렇게 최소 굴착량을 나타난 지점이 상하행선에서 동일한 것은 이 구역이 TBM 굴착작업을 어렵게 만드는 지반조건을 갖는 것이 확실함을 알 수 있다. 이의 최고점도 4지점인데, C 및 D 구역은 상하행선에서 거의 일치하고 있다. 이에 반하여 A 및 B 지역은 그 위치가 불분명하고 굴진장의 크기도 큰 차이를 보이고 있다. 이러한 현상으로 미루어 볼 때 굴착작업이 용이한 지역에서의 굴착량의 크기 분석은 큰 의미를 갖지 못한다고 할 수 있다.

한편 주간 굴착량의 최저점 위치는 상행선에서 하행선보다 약 0.1 km 선행하는 것으로 나타났는데 이는 Fig. 1의 터널 평면도에서 설명하고 있는 지질구조와 잘 일치하고 있는 것으로 분석된다. 그리고 이 지질구

조는 굴착 종점 부근에서 역전되고 있는데, 굴착량 분석에서 D 지역인 약 3.1 km 지점에서는 상하행선에서 동시에 나타나는 것으로 해석할 수 있다.

3.3. 주간평균 순굴착속도

지반조건에 따라 굴진장의 크기가 변화하여 어려운 조건에서는 굴착량이 작아지는 것은 확실하지만, 굴착 작업이 용이한 지역에서는 그 경향이 분명하지 않음을 주간 굴착량 분석을 통하여 밝혀졌다. 동일한 여건으로 TBM 장비를 운영한다면 지반의 특성에 따라 좌우되는 요소는 순굴착속도이다.

Fig. 5는 주간 평균 순굴착속도(단위는 m/h)의 변화를 도시한 것인데, 이는 주간 굴착량의 변화와 같은 경향으로 대략 8번의 꼭지점을 보이고 있다. 이러한 꼭지점들은 굴착량 분석에서의 지점과 정확히 일치하지는 않지만 전반적인 경향은 유사하다. 굴착 시점의 자료를 제외하면 주간 평균 순굴착속도의 최대 및 최소 크기는 상행선에서는 1.8 m/h 및 3.0 m/h이며, 하행선에서는 1.6 m/h 및 2.5 m/h이다.

굴착작업이 보다 원활히 수행된 하행선에서 자세히 관찰하면 크게 세구역으로 나누어 분석할 수 있다. 5번째부터 15번째 주까지는 높은 속도를 기록하였는데, 이의 크기는 9번 및 10번째를 제외하고 전체 평균보다 큰 값인 2.0~2.3 m/h를 기록하였다. 즉 굴착초반은 E 지역을 제외하면 용이한 지반조건을 갖는 것으로 평가된다. 상행선에서 굴착초반의 속도변화는 양상이 약간 다르며 최고 및 최저점들의 위치가 일치하지 않는 경향을 띠고 있다. 이는 터널의 평면도에서 알 수 있듯이 약 0.5~1.1 km 구간에 3개의 단층대가 있기 때문인 것으로 판단된다.

굴착중반인 29번째 주까지는 아주 낮은 속도를 기록하였는데 21번째 주를 제외하면 2.0 m/h 이하이다. 굴진 누적거리가 1.3~2.5 km인 이 구역은 전반적으로 굴착이 어려운 지반조건을 갖는 것으로 해석된다. 그 후

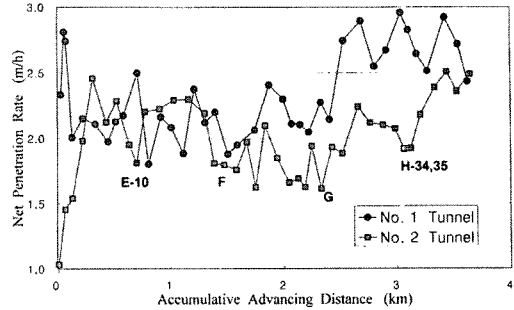


Fig. 5. Weekly average of net penetration rate

굴착중반인 1.1 km 구간은 전반적으로 높은 순굴착속도를 보인다. H 지점의 두 주간의 속도는 평균보다 불과 5%정도 작은 속도이지만 그 외의 9개 주간의 속도는 2.1 m/h부터 2.5 m/h까지 기록하였다. 즉 중반구간은 초반과 같이 굴착이 용이한 지역이며 다양한 크기의 순굴착속도를 보이고 있다. 특히 D지점은 전체의 최대 순굴착속도를 기록하였는데, 상행선의 경향은 2~3주마다 최대 및 최저점이 반복되는 경향을 갖는 것이 특징이다.

3.4. 암반특성과의 상관관계

TBM으로 선진굴착한 후에 발파에 의한 터널 확장에서 지보설계를 위하여 RMR을 측정하였다. 두 터널에서 약 90회 구간으로 암반등급은 교차하는 것으로 판정되었으며, 1등급부터 5등급으로 모든 암반등급이 나타났다. RMR 값을 기준으로 한 암반의 등급에 따른 순굴착속도 및 가동률을 분석한 결과는 Table 3과 같다. Fig. 6은 하행선에서 암반등급별 굴착길이와 가동률, 순굴착속도를 도시한 것이다. 여기에서 알 수 있듯이 등급별 구간의 총 굴착길이는 균등한 분포를 보이고 있으며 연암일수록 순굴착속도는 크게 분석되었다.

또한 장비의 가동률도 불량암반 또는 연암일수록 높

Table 3. TBM performance and rock mass classification

Pattern for tunnel support	No.1 Tunnel			No.2 Tunnel		
	net P.R. (m/h)	exc. length (km)	op. degree (%)	net P.R. (m/h)	exc. length (km)	op. degree (%)
I	2.13	0.77	31.4	1.84	0.84	32.2
II	2.19	0.56	31.4	1.93	0.59	33.5
III	2.33	0.91	32.3	2.02	0.94	35.1
IV	2.35	0.77	33.1	2.15	0.67	32.6
V	2.54	0.61	27.6	2.18	0.59	31.4

은 값으로 분석되지만 최고 불량한 암반인 5등급에서는 아주 작은 값으로 나타났다. 가동률의 최대값은 3등급 또는 4등급에서 기록되었는데 이는 강한 암반에서는 커터의 마모로 인한 휴지시간이 많아지며, 불량 암반에서는 과도한 지보작업으로 휴지시간이 길어지는 것으로 판단된다. 따라서 가동률과 순굴착속도에 의한 굴진속도는 3등급 또는 4등급 암반에서 크게 나타나는 것으로 평가할 수 있다.

Fig. 7은 TSP로 측정된 현지 암반의 탄성계수와 순굴착속도와의 상관관계를 도시한 것이다. 터널의 TBM 굴착을 하면서 전방의 지반조건을 파악하기 위하여 1998년 3월부터 TSP 측정을 수차례 수행하였는데 상하행선에서 33개 지점의 현지암반 탄성계수를 얻은 자료를 활용한 것이다. 이들의 관계는 전체적으로 반비례하는 경향을 뚜렷이 보이고 있다.

Fig. 6과 Fig. 7에서 알 수 있듯이 RMR 값이 낮고

탄성계수가 낮은 연암일수록 순굴착속도가 크다. 이러한 현상은 Barton이 제시한 Q-TBM의 연구(Barton, 1999)에서 제시된 바 있는데, 암반을 이루고 있는 암석이 보통암 이상으로 강한 경우에는 암석이 강할수록 순굴착속도가 작아지는 현상이 있다고 설명하는 것과 일치한다. 또한 밀양댐 도수로 터널공사에서 얻어진 극경암에서의 Schmidt 반발경도나 RMR과의 관계(박철환 외, 1999 & 2001)에서도 이러한 현상이 분석된 바 있는데 유사한 경향으로 나타났다. 이러한 유사성은 TSP 측정이 터널 전방을 유추하는 정성적 방법으로 유용할 뿐 만 아니라 앞으로의 TBM 굴착을 예견할 수 있는 방안이 될 수 있는 것으로 판단된다. 또한 언급된 여러 연구들의 결론이나 제안을 뒷받침할 수 있는 자료가 될 수 있는 것으로 평가된다.

4. 커터수명 평가

커터의 수명은 여러가지로 정의할 수 있는데, 한 개의 커터가 소모될 때까지 굴착할 수 있는 부피로 정의되는 부피수명이 많이 활용되고 있다(박철환 외, 1991). 이는 공학적으로 가장 이상적인 단위이지만 TBM 가동에 있어서 커터의 교체시기를 일견 예견하기에는 쉬운 단위가 아니다. 따라서 이에 굴착단면적을 적용하여 굴착할 수 있는 터널길이 또는 사용시간의 단위로도 표시하는데, 이는 예견이 쉬운 장점이 있을 뿐 과학적 단위는 될 수 없다. 이러한 수명은 커터의 재질 및 크기 그리고 굴착대상 암반의 특성, 특히 암석에 함유된 석영의 양에 따라 달라진다(NTNU, 1994). 암반요소에 크게 좌우되지 않는 커터 고유의 수명은 궤적거리로 정의하고 있다. 국내외에서 암반에 대한 정확한 평가가 없는 경우 17인치 크기의 디스크 링의 수명은 150~200 시간 및 약 500 km로 예측하고 있다(유원건설, 1999).

죽령터널의 상행선에서는 커터소모량이 구체적으로 보고되었는데 292개의 커터가 소모되었으며, 이는 9.4 set에 해당된다. 이러한 자료로부터 산출할 수 있는 각종 커터의 수명은 Table 4에 수록하였다. 즉 전체적 수명은 197 m³/c 및 167 h/set, 385 m/set로 분석되었다. 여기에서 시간수명은 앞에서 언급한 일반적인 평균수명의 범위에 포함되어 있어 적정 소모량을 유지했다고 볼 수 있다. 한편 궤적거리수명은 716 km 또는 877 km로 분석되어 알려진 수명보다 큰 값을 보이고 있다.

22개가 장착된 외곽커터도 전체보다 작은 8.7 set가 소모되어 각종 수명도 전체 평균값보다 약간 좋은 것으로 평가된다. 이러한 현상은 중심커터 및 게이지커터가 그 기능으로 인하여 효율적으로 사용될 수 없으므로 야

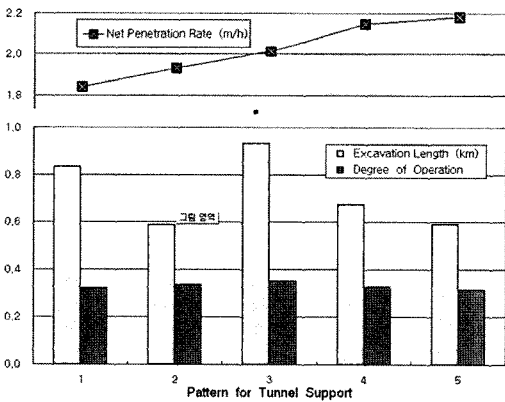


Fig. 6. TBM performance data on pattern for tunnel support in No.2 Tunnel

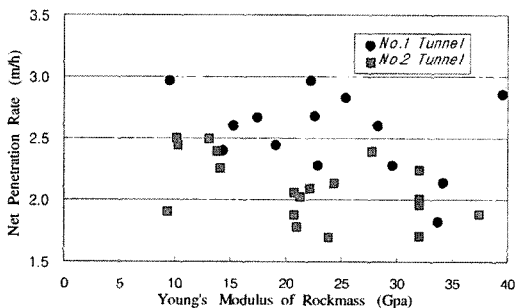


Fig. 7. Relationship between net penetration rate and Young's modulus

Table 4. The results of cutter life in No.1 tunnel

cutter and life	overall	center cutter	outer cutter	gauge cutter
Numbers for a set	31	4	22	5
Numbers of Consumption	292	14	191	87
Cutter Life in Volume (m ³ /c)	197	89	284	25
Cutter Life in Time (h/set)	167	450	182	91
Cutter Life in Length (m/set)	385	1035	417	208
Length of Rotating Trace (km)	716	283	877	768

기되는 일반적인 현상이다. 중심커터는 3.5 set만 소모되었지만 부피수명은 외곽커터의 31% 수준이며, 궤적거리수명도 283 km로 매우 작게 평가되는데 이는 중심커터가 담당하는 굴착단면적이 작기 때문이며 일반적 현상이다. 게이지커터의 소모량은 17.4 set로 매우 크다. 외곽커터에 비하여 게이지커터의 시간 및 거리수명은 절반수준이며, 부피수명은 9%, 그리고 궤적수명은 85%로 평가된다.

Table 5는 상행선 굴착작업에서 분석된 커터의 수명 또는 소모량의 크기를 비교평가하기 위하여 TBM 굴착의 선진국이라 할 수 있는 노르웨이의 터널현장자료를 소개한 것이다. 이 현장은 노르웨이 국립공과대학(NTNU)이 있는 트론하임으로부터 동쪽 80 km에 위치한 Meråker (메로케르) 지역의 전력을 증설하기 위한 수력사업의 하나이다. 이 수로터널은 연장이 10 km 인데 12개월 만에 굴착이 완료되었으며, TBM 운영에 대한 상세한 기술자료가 보고된 바 있다(Johannessen et al., 1998).

이 현장에는 일축압축강도가 300 MPa 이상이 되는 암반이 나타나기도 하지만 표에서 보는 바와 같이 순굴착속도가 6.4 m/h에 달하였다. 이는 굴착직경이 상행선보다 작은 3.5 m인 점을 고려하더라도 설계 및 운영자

들도 예상치 못한 크기이며, TBM 가동에서 큰 추력을 제공하고 커터의 소모가 집중되지 않도록 커터배열을 재설계한 결과로 받아들여지고 있다. 여기서 커터의 전체소모량은 506개로 20.2 set이며, 중심커터는 12 set, 외곽커터는 22.3 set, 그리고 게이지커터는 19.8 set이다.

메로케르 터널현장에서 커터의 부피수명은 평균 183 m³/c이고, 외곽커터의 수명은 이보다 15% 정도 큰 211 m³/c로 분석되었다. 따라서 죽령터널 상행선의 암반은 이에 비하여 비교적 연암으로 커터의 마모가 적어 수명이 큰 것으로 평가될 수 있다. 이는 죽령터널 지보설계에서의 암반평가와 메로케르 현장에서의 암반평가로부터 얻을 수 있는 결과와 일치한다. 그러므로 커터의 부피수명은 대체로 이러한 크기로 판단되어 230 m³/c (약 30%의 오차) 수준이며, 중심커터 및 게이지커터의 부피수명은 외곽커터의 40~60% 수준이라고 결론지을 수 있다.

메로케르 터널현장에서 커터의 시간수명은 상행선에서의 크기와 일반적으로 알려진 크기에 비하여 매우 작은 것으로 분석되었는데 이는 굴착속도가 매우 높기 때문에 발생한 것이다. 따라서 일반적으로 알려진 150~200 시간이라는 시간수명의 크기는 상행선에서 적용가능한 것이지만, 높은 추력과 이로 인한 큰 압입깊이로

Table 5. Cutter life in Meråker project

cutter and life	overall	center cutter	outer cutter	gauge cutter
Numbers for a set	25	4	17	4
Numbers of Consumption	506	48	379	79
Cutter Life in Volume (m ³ /c)	183	86.4	210	111
Cutter Life in Time (h/set)	74.5	126	67.6	76.3
Cutter Life in Length (m/set)	477	804	433	488
Length of Rotating Trace (km)	329	117	348	658
net penetration rate (m/h)		6.40		
depth of penetration (mm)		7.96		

TBM을 운영할 때는 크게 줄어든다고 할 수 있다. 거리수명은 두 현장에서 비슷한 크기를 보이는데 이의 크기는 약 420 m/set 정도이다. 암반의 특성이나 장비의 특성 그리고 운영이 전혀 다른 두 현장에서 비슷한 크기를 보였는데 이는 앞으로 다른 현장자료와 비교되어야 할 것이다. 상행선에서는 게이지커터의 소모가 비교적 많아 이의 크기는 절반 수준인 208 m/set로 분석되어 비효율적인 사용이 이루어졌다고 평가할 수 있다.

상행선에서의 궤적거리수명은 일반적으로 알려진 수명보다 큰 값을 보이고 있는 반면에 메로케르 현장은 330~350 km에 불과하다. 이러한 크기는 시간수명의 평가에서와 같이 굴착속도가 매우 높기 때문에 발생한 것이다. 따라서 궤적거리수명은 시간수명과 마찬가지로 높은 추력과 큰 압입깊이로 TBM을 운영할 때는 크게 줄어든다고 할 수 있다. 게이지커터는 배열위치로 인하여 부피수명은 작다하더라도 궤적거리수명은 외곽커터보다 큰 값을 갖는 것이 이상적이라 평가된다. 따라서 메로케르 현장과 비교할 때, 상행선에서 게이지커터의 궤적거리수명은 작은 값으로 평가되어 게이지커터의 소모는 많은 것으로 판단된다.

5. 결 론

대구와 춘천을 연결하는 중앙고속도로의 죽령터널에서 상하행선 두개의 터널은 발파에 의한 굴착에 앞서 TBM으로 선행 굴착되었다. 두 대의 TBM 시공은 약 1년간 수행되었으며 총 연장은 7.3 km이다. 여기서 얻어진 TBM 굴착자료로부터 순굴착속도를 비롯하여 가동률과 커터의 소모량을 분석하였다. 이러한 순굴착속도는 지반조사 및 굴착과정에서 얻어진 현지 암반의 특성과의 상관관계를 얻었으며, 커터의 소모량은 노르웨이의 굴착자료와 비교분석하여 평가하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 상하행선에서의 순굴착속도는 각각 2.3 m/h 및 2.0 m/h이다. 이러한 크기는 노르웨이 현장과 비교할 때 매우 낮은 크기로 평가되는데 이는 TBM 장비의 능력에도 기인된다. 상행선에서 굴착속도는 높지만 직경이 서로 달라 굴착량으로 분석할 때 하행선에서 더 높은 굴착효율을 기록한 것으로 분석된다. 더욱이 순굴착속도의 편차는 하행선에서 상대적으로 적으며, 가동률의 크기는 각각 31.4% 및 33.3%로 나타나 하행선에서 보다 원활한 작업이 이루어졌음을 알 수 있다.
2. 주간 평균 순굴착속도의 최고 및 최저점은 반복하

여 나타나는데 전체적으로 8번의 꼭지점을 보이고 있다고 평가되는데 이는 지반의 조건에 의한 것으로 판단된다. 또한, TBM 시공구간의 지반 조건은 크게 세 구역으로 나누어 설명할 수 있는데 초반은 복잡한 지반조건으로 순굴착속도의 변화가 심한 구간으로 나타났다. 그리고 1.1 km부터 2.5 km 지점의 중반은 순굴착속도가 낮아 굴착이 어려운 구간이며, 중반은 비교적 굴착이 용이한 구간으로 평가된다. 그러나 주간 굴착량 분석에서는 이러한 전반적인 경향은 뚜렷하지 않으므로 주간 평균 순굴착속도의 분석이 보다 중요한 평가 방법이라고 할 수 있다.

3. 지보설계 및 TSP 측정을 통하여 얻어진 현지 암반 조건에서 경암일수록 순굴착속도가 줄어드는 경향을 보인다. 이는 과거의 여러 연구에서 분석된 경향과 같다. 따라서 지보설계를 위한 RMR 값은 순굴착속도를 정성적으로 예측가능하는 요소이고 TSP 측정이 터널 전방을 유추하는 정성적 방법으로 유용하며, 앞선 연구들을 뒷받침할 수 있는 자료가 될 수 있는 것으로 판단된다.
4. 두 터널현장에서 커터의 수명은 30% 정도의 오차를 갖고 230 m³/c 및 420 m/set로 평가되었다. 이러한 크기는 암반이 극경암 또는 연암이 아닌 경우에 적용가능한 것이라 판단된다. 순굴착속도가 큰 경우에는 시간수명 및 궤적거리수명이 작아지는 것으로 분석되었는데 이는 공학적으로 타당한 경향이다. 이때 수명은 75 h/set 및 170 h/set, 그리고 330 km 및 880 km로 편차가 크게 발생한다.
5. 중심커터와 게이지커터는 배열위치와 기능 때문에 외곽커터의 수명에 비하여 매우 낮은 수명을 갖지만, 게이지커터의 궤적거리수명은 비슷한 크기인 것으로 판단된다.

이러한 평가연구는 TBM 굴착의 계획과 시공단계에서 원활한 굴착작업을 수행하는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 특히 TBM에 의한 선행 굴착공법은 남산1호 터널과는 달리 경제적 측면에서 시도되었으므로, 이의 효과가 입증된다면 앞으로 대대면 장대터널의 계획이나 설계단계에서 추천할 만한 것이라 할 수 있다.

참고문헌

1. 박철환 외, 1991, 전단면 터널 굴착기술 개발연구, 한국자원연구소 연구보고서 KR-91-(B)-15, 과학기술처
2. 박철환, 김길수, 1992, 암반기계굴착공법의 적용연구, 한국암반역학회지 제2권 제1호

3. 박철환 외, 1999, 밀양댐 도수로터널의 암반물성 및 TBM 굴착속도 분석연구, 한국자원연구소 연구보고서
4. 박철환 외, 2001, TBM penetration rate with rock mass properties in hard rock, Proceedings of 2001 ITA Symposium, Milano
5. 유원건설, 1999, TBM 공법
6. 코오롱건설(주), (주)한양, 1998, 중앙고속도로 죽령터널 TBM공사 시공보고서
7. 한국도로공사, 1996, 중앙고속도로 토질조사보고서
8. Barton N., 1999, TBM performance estimation in rock, Tunnels and Tunnelling International
9. Hansen, A., 1998, The history of TBM tunnelling in Norway, Norwegian TBM Tunnelling, NSREA
10. Johannessen, S., Askilsrud O. and Bruland A., 1998, The Meråker project, Norwegian TBM Tunnelling, NSREA
11. NTNU, 1994, Project Report 1-94, Hard rock tunnel boring, NTNU

박철환



1979년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1981년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1987년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 042-868-3244
 E-mail: cwpark@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원

신중호



1983년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1985년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학석사
 1990년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학박사

Tel: 042-868-3242
 E-mail: jhsynn@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원

박연준



1981년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1983년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1992년 미국 Minnesota 대학교 대학원 토목공학과 공학박사

Tel: 031-220-2580
 E-mail: yjpark@suwon.ac.kr
 현재 수원대학교 토목공학과 교수

전석원



1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1989년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1996년 미국 아리조나 주립대학 공학박사

Tel: 02-880-8807
 E-mail: sjeon@snu.ac.kr
 현재 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

안형준



1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1996년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사

Tel: 031-329-0634
 E-mail: hjan@kolon.com
 현재 코오롱건설(주) 기술연구소 과장