

암반기계굴착공법의 적용연구

박철환¹⁾ · 김길수²⁾

Application of TBM/TBE to Mechanical Excavation in Rock

Chulwhan Park¹⁾ · Kilsoo Kim²⁾

ABSTRACT

As tunnel becomes longer and larger, TBM has become one of the most popular methods of excavation in rock. This paper describes the degree of operation, the degree of availability and penetration rate of TBM and TBE applied in Namsan roadway tunnelling site.

Net penetration rate was 1.62m/hr for TBM and 0.72m/hr for TBE. Net penetration rate showed no direct relation to daily advance or penetration time, but the lower bound of penetration rate could be obtained from the relation with daily advance.

For both of TBM and TBE, the degree of operation and the degree of availability were 33.8% and 68.6% respectively. Life time of normal cutter was 310m³ for TBM and 194m³ for TBE, while that of center and gauge cutter was about 50m³. When the two machines were compared, TBM showed 80% higher penetration rate, and 40% shorter life time of cutter.

1. 서 언

서울도심의 교통난 해소를 위하여 남산1호 터널을 쌍굴로 굴착하고 필동 및 한남동 도로를 25~40m로 확대하는 총연장 3,900m의 도로확장공사가 1989년 6월부터 시작되었다. 본

논문은 3년간의 도로확장사업 중에서 직경 11.3m의 새로운 터널을 굴착하는데 적용된 TBM/TBE 공법을 소개하고 기계굴착에서 얻어진 자료를 공학적으로 분석한 것이다.

새로운 터널을 굴착함에 있어 기존터널의 안

* 1992年 6月 接受.

1) 한국자원연구소 암반공학연구실

2) 진로건설주식회사 남산터널현장소장

정성을 도모하고 발파에 의한 비산, 진동, 소음 등을 방지하기 위하여 TBM(Tunnel Boring Machine) 공법을 채택하였다. 터널의 직경이 7~8m 이하일 때는 한번의 굴진으로 터널굴착이 완성될 수 있으나 직경이 11.3m일 때는 TBM에 의한 Pilot Tunnel을 먼저 굴착하고 다시 TBE라고 불리는 확대굴착기로서 2차에 걸쳐 굴착을 완성하는 것이 경제적이므로 본 공사는 이를 채택하였다. 확대굴착기를 사용한 기계굴착공법을 특히 TBE 공법이라고도 한다.

2. 지질개요

전체 터널구간은 약 1,500m로서 전반적으로 지질조건은 양호하나 한남동 350m구간은 풍화된 편마암으로 구성되어 있고 수맥이 발달되어 있다. 필동쪽은 흑운모를 함유한 화강암지역으로 기계굴착에 적당한 암질로 평가된다. (참고 그림 1)

터널구간에서 뚜렷하게 발달된 불연속면은 없으나 한남동 입구는 그 간격이 작고 풍화되어 붕락이 많았다. 전체적으로 주향은 N(35°~45°)W 및 N(10°~20°)E이며 경사는 각각 70°~80° SW 및 30°~40° NW이다.

3. 굴착기의 개요

직경 11.3m의 터널을 완성하기 위하여 두종류의 굴착기를 사용하였다. 즉 직경 4.5m의 TBM으로 Pilot Tunnel을 굴착한 다음 TBE로서 확대굴착하여 원하는 크기의 터널을 굴착하였다. 터널의 총연장은 1,500m이나 Pilot Tunnel을 굴착하는 동안 한남동 입구에서 붕락이 잦은 이유로 TBE는 필동쪽에서 굴착을 시작함과 동시에 한남동 쪽에서는 약 500m 구간을 발파에 의한 NATM 공법으로 확대굴착하였다. 이로서 TBM 및 TBE의 굴착연장은 각각 1,

500m 및 1,000m이다.

두 기계의 굴착직경은 4.5m 및 11.3m이며 한 사이클에 의한 굴진거리는 다같이 1.8m이다. 실제 공사에서는 Boring Stroke를 1.5m로 하였다. 두 굴착기계의 제원은 다음 표 1과 같으며 Cutter Head에 부착된 커터의 운동반경을 알기 위하여 일직선에 표시하면 그림 2와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 TBM의 커터간격(Spacing)은 80mm이며 TBE는 Center Cutter는 없으며 61개의 커터에서 56개가 60mm간격으로 배열되어 있으며 가장자리에 위치한 5개의 커터는 간격이 거의 없다.

Table 1 Specifications of TBM/TBE

Working Site	Namsan TBM	Namsan TBE	
Excav. Period	89.12~90.7	91.9~92.3	
Excav. Distance	1,460m	1,020m	
Machine Type	TBM, Robbins	TBE 11, Wirth	
Number of Cutters	Center	4	
	Outer	26	57
	Gauge	4	4
	Total	34	61
Bore Diameter	4.5m	11.3m	
Revolutions Rate	7.3rpm	2.7rpm	
Boring Stroke	1.8	1.8	
Total Weight	300ton	500ton	
Motor Power	4×160kW	6×200kW	

4. 기계굴착의 성능해석

(1) 굴착속도

기계굴착공법에서 굴진성능은 순굴착속도와 작업율에 의하여 결정된다. 순굴착속도(Predicted Penetration Rate)는 Cutter Head의 회전수와 커터의 절삭심도에 의해 결정되는 순

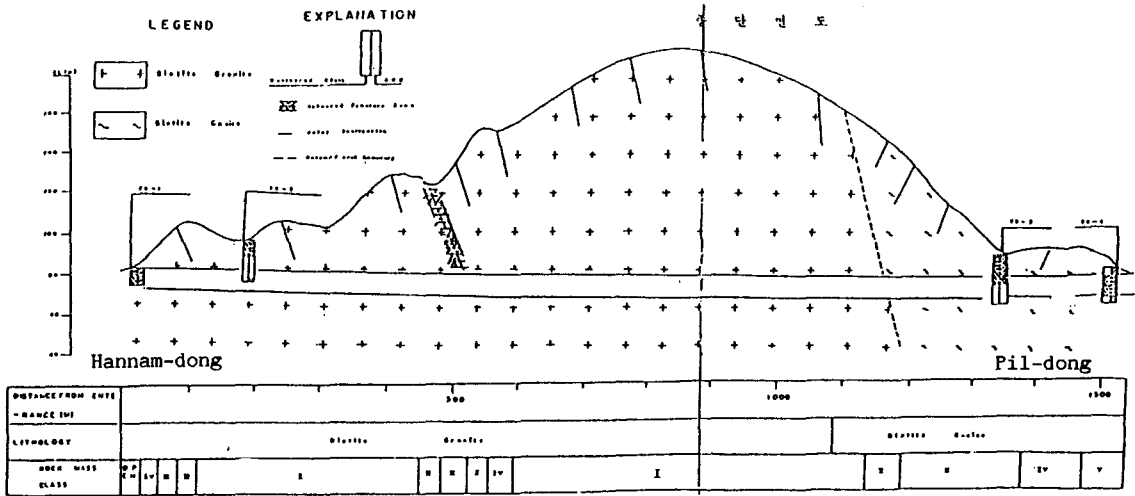
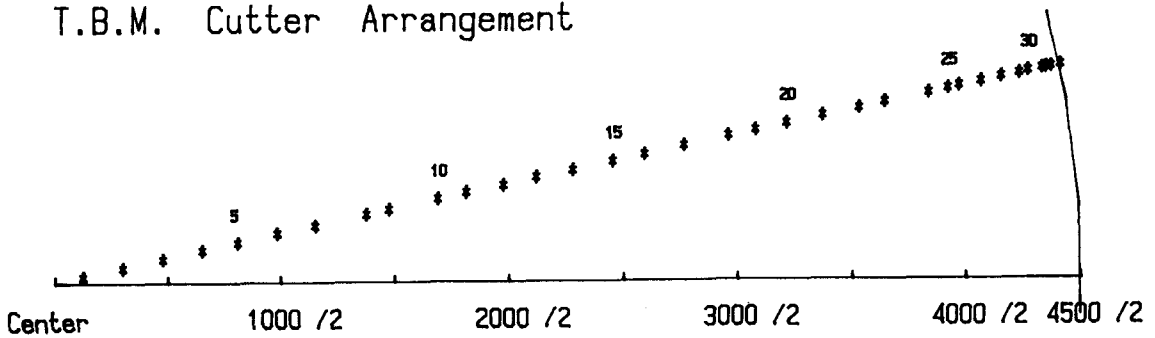


Fig. 1 General geology and rock classification of Namsan tunnel site

Namsan Roadway Pilot Tunnel
T.B.M. Cutter Arrangement



Over-All Spacing = $4.5 \text{ m} / 2 / 34 \text{ space} = 66 \text{ mm}$

Normal C.Spacing = $3.2 \text{ m} / 2 / 20 \text{ space} = 80 \text{ mm}$

Fig. 2 Spacing and cutting diameter of cutter in TBM

수한 이론적 값으로 다음과 같다.

$$V_p = p \cdot n$$

V_p : Predicted Penetration Rate

p : Depth of Penetration of Cutter

n : Revolution Rate

윗 식에서 p 의 단위를 mm, n 의 단위를 rpm으로 사용할 때 m/hr의 단위를 갖는 순굴착속도는

$$V_p = 0.06 \cdot p \cdot n$$

이다.

두 굴착기의 최대회전수는 표 1에서 알 수 있듯이 7.3rpm 및 2.7rpm이며 절삭심도는 4mm 및 6mm로 설계되었다. 따라서 TBM의 이론적 굴착속도는 1.75m/hr이며 TBE는 0.97m/hr이다.

남산터널공사에서 1989년 12월부터 8개월동안 수행한 TBM에 의한 Pilot Tunnel 굴착과 1990년 9월부터 8개월동안 수행한 TBE에 의한 확대굴착을 통하여 매일 얻어진 자료로서 굴착거리, 굴착시간 및 굴착속도 등의 관계를 표시한 것이 그림 3 부터 그림 10이다.

그림 3과 4는 매일의 작업량과 굴착속도를 표시한 것이며 그림 5와 6은 자료를 일주일단위로 해석한 것이다. 그림 7과 8은 순굴착시간과 굴착거리의 상관관계를 표시한 것으로 이들 사이에는 뚜렷한 관계가 없는 것으로 결론지을 수 있다. 이들 상관관계의 평균직선은 굴착속도의 평균치로서 TBM 및 TBE에서 각각 1.62m/hr, 0.72m/hr로 나타났다.

이러한 굴착속도의 크기는 이론치의 75~90% 수준이다. 실제 굴착속도가 이론치보다 작게 나타나는 이유는 보통 작업시에 최대회전율을 사용하는 경우가 매우 희박하며 재설치한 후에는 매우 작은 크기의 회전수로 시동하기 때문이다.

또한 그림 9와 10은 매일의 굴착량에 대한

굴착속도를 표시한 것으로 앞에서와 같이 뚜렷한 상관관계는 없으나 굴착량에 대한 최소의 굴착속도를 얻을 수 있다. 매일의 굴착거리를 $D(m)$ 라 하고 굴착속도를 $PR(m/hr)$ 라 할 때 최소의 PR 크기는

$$PR(TBM) = 0.106 \times D$$

$$PR(TBE) = 0.056 * D$$

이다.

한편 TBM과 TBE의 능력은 굴착속도로 비교하면 규모가 작은 TBM이 이론적으로는 1.8배이나 실제에는 2.2배 우수한 것으로 나타났다. 그러나 Cutter Head의 단면적을 고려하여 굴착량의 속도로 비교할 때 대규모의 장비가 우수한 것으로 판단되며 본 공사에서는 TBE가 2.5배 큰 것으로 결론지을 수 있다. 또한 TBE는 표 1에서 알 수 있듯이 모터의 구동력이 TBM에 비하여 1.8배 크므로 전체적효율은 1.4배 높다고 할 수 있다.

(2) 작업률과 가동률

TBM이나 TBE 등 굴착장비를 사용하여 굴착할 때 작업률이라 함은 전체 작업시간에 대한 굴착작업의 시간비율을 뜻한다. 이때 굴착작업은 순전히 굴착을 수행하는 시간(Net Penetration Time)외에 재설치하는 시간(Resetting Time)을 포함하며 버럭처리시간(Mucking Time)은 포함하지 않는다. 왜냐하면 재설치작업은 순굴착작업사이에 필수적으로 요구되며 버럭을 처리하는 여러가지 운반작업은 순굴착작업과 동시에 수행할 수 있기 때문이다.

실제로 굴착작업을 중단시키는 요인은 기계에 의해 발생하는 요인과 암반조건에 의한 요인, 작업장에서 발생하는 여러 요인으로 대별될 수 있다. 이로서 작업률(Degree of Operation)은 다음과 같이 정의한다.

$$\eta_o = T_o / T_i = 1 - [(T_A + T_B + T_C) / T_i]$$

여기서, $T_o = T_n + T_r$,

η_o : Degree of Operation of TBM

T_o : TBM Operation Time

T_n : Net Operation Time

T_r : Resetting Time

T_1 : Total Working Time

T_A : Time Loss for Machine Condition

T_B : Time Loss for Rock Formation Condition

T_C : Time Loss for Working Site Condition

이에 비하여 가동률은 커터나 기계의 점검시간을 포함한 시간비율로 정의한다. 이는 TBM 등의 장비를 효율적으로 사용하기 위하여 정기적으로 점검해야 하며 커터를 교체해야 하는데 여기에 소요된 시간을 기계사용시간으로 간주하기 때문이다. 따라서 가동률(Degree of Availability)은 기계장비를 얼마나 많이 사용하고 있는 가를 나타내는 지표이며 다음과 같이 정의한다.

$$\eta_a = (T_o + \dot{T}_A) / T_1$$

여기서, η_a = Degree of Availability of TBM

\dot{T}_A = Requiring Time for Maintenance of Cutters and Machine Except Machine Repair

한편 순가동률은 순굴착시간 만의 비율로 정의되며 다음 식으로 얻어진다.

$$\eta_n = T_n / T_1$$

남산터널의 TBM/TBE에서 순가동률은 23.5% 및 31.5%이며 작업률은 26.3% 및 40.2%로 나타났다. 그리고 이들의 가동률은 각각 59.4%와 76.6%이다.

그림 11과 12는 TBM/TBE 작업에서 얻어진 주간 순가동률과 작업률의 변화를 천공속도와 함께 도시한 것이다. 여기에서도 천공속도

의 변화와 두 시간비율의 변화추이는 크게 관련되지 않는다. 다만 시간이 경과함에 따라 작업자의 숙련도의 증가로 각각의 크기가 증가하는 것이 뚜렷할 뿐이다.

총작업시간은 TBM에서 214일, 3,863시간이며, TBE에서 231일, 4,500시간이다. 이들 두 작업에서 얻어진 각 공정별 시간비율을 다이아그램으로 표시하면 그림 13과 같다. 16개월동안 수행된 TBM/TBE 기계굴착에서 순가동률은 27.8%, 작업률은 33.8%, 그리고 가동률은 68.6%로 분석되었다.

(3) 커터 소모율

커터의 간격이 80mm 및 60mm인 두 굴착기에 장착되는 커터수는 34개 및 61개이다. TBM에서 1,500m굴착에 소요된 총수는 184개이며 한 개의 커터굴착량은 127m³이다. 비교적 비효율적 작업을 수행하는 Center Cutter와 Gauge Cutter의 수명은 41.9m³ 및 59.0m³으로 분석되었으며 이를 굴착거리를 표시하면 490m 및 115m이다. 그리고 26개의 Normal Cutter의 평균수명은 310m³ 및 529m로 해석되었다.

TBE는 1,000m를 굴착하면서 총 603개의 커터가 소요되어 이의 평균수명은 143m³으로 나타났다. 부착되는 전체 커터에서 Gauge Cutter를 포함한 맨가장자리에 위치한 8개 커터에는 총 154개의 커터가 소요되었으며 평균수명은 45.7m³ 및 53m이다. 그리고 60mm의 일정한 간격을 가진 커터의 평균수명은 194m³ 및 137m로 나타났다.

그림14와 그림15는 굴착속도와 함께 커터점검 및 교체에 소요된 시간비율을 주간단위로 표현한 것이다. 여기에서 굴착속도는 이의 시간량에 비례하는 경향을 갖고 있으며 특히 커터를 교체한 직후에 굴착속도가 극대화됨을 알 수 있다.

그림16과 그림17은 각 커터의 위치에 따른

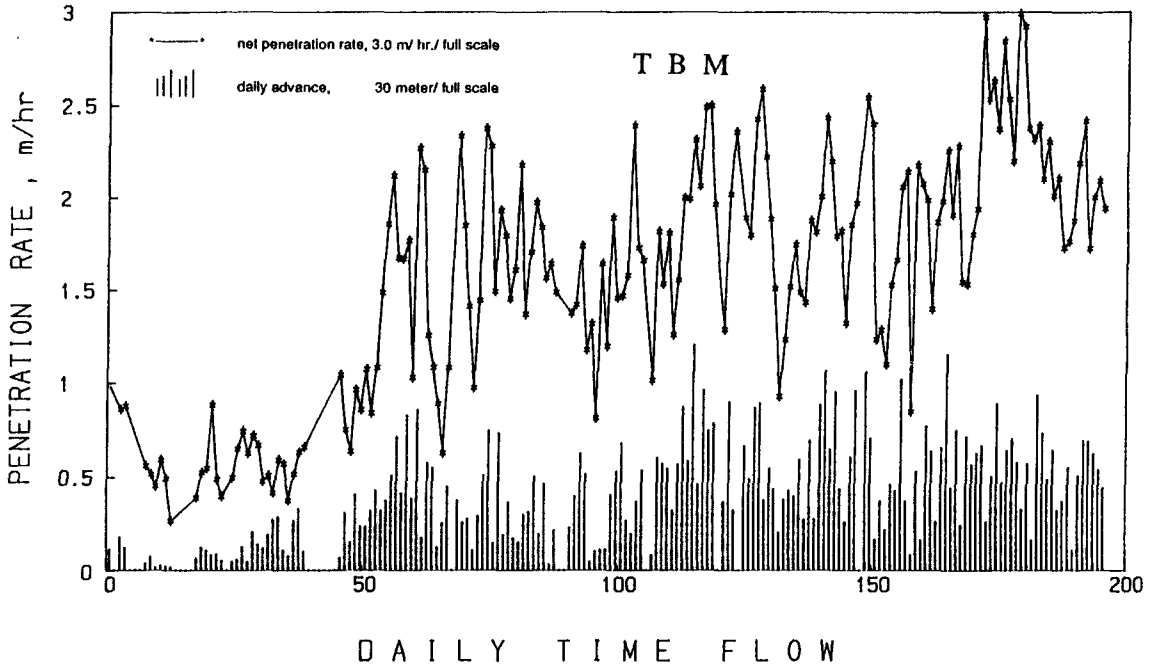


Fig. 3 Daily data of net penetration rate and advancing distance in TBM

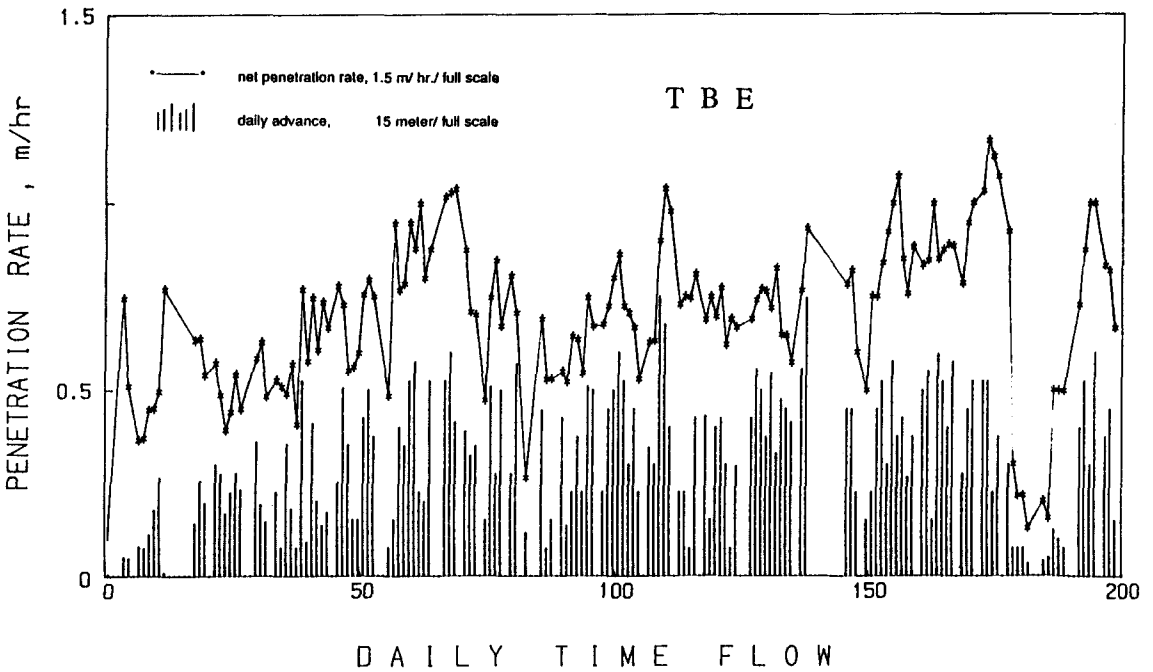


Fig. 4 Daily data of net penetration rate and advancing distance in TBE

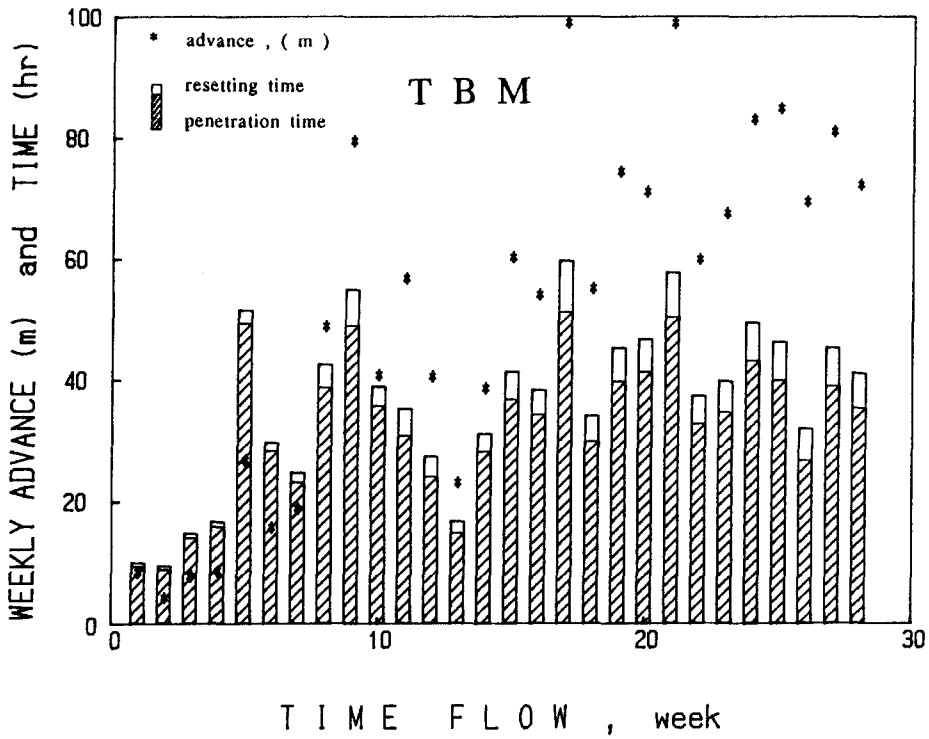


Fig. 5 Weekly data analysis of advancing distance, resetting time and net penetration time in TBM

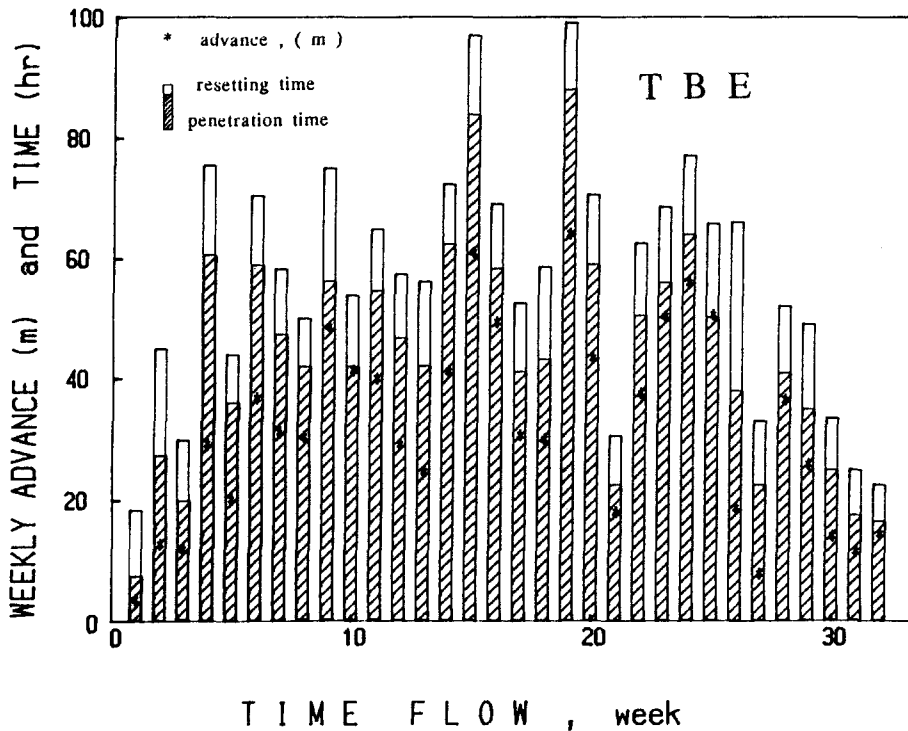


Fig. 6 Weekly data analysis of advancing distance, resetting time and net penetration time in TBE

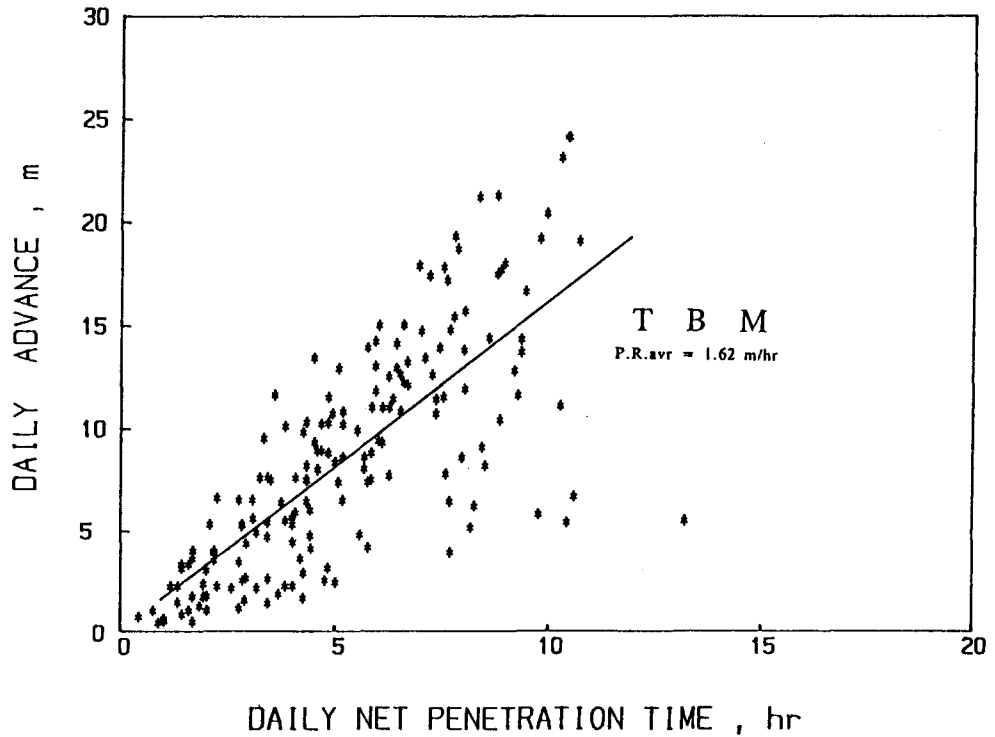


Fig. 7 Relationship between daily net penetration time and advancing distance in TBM

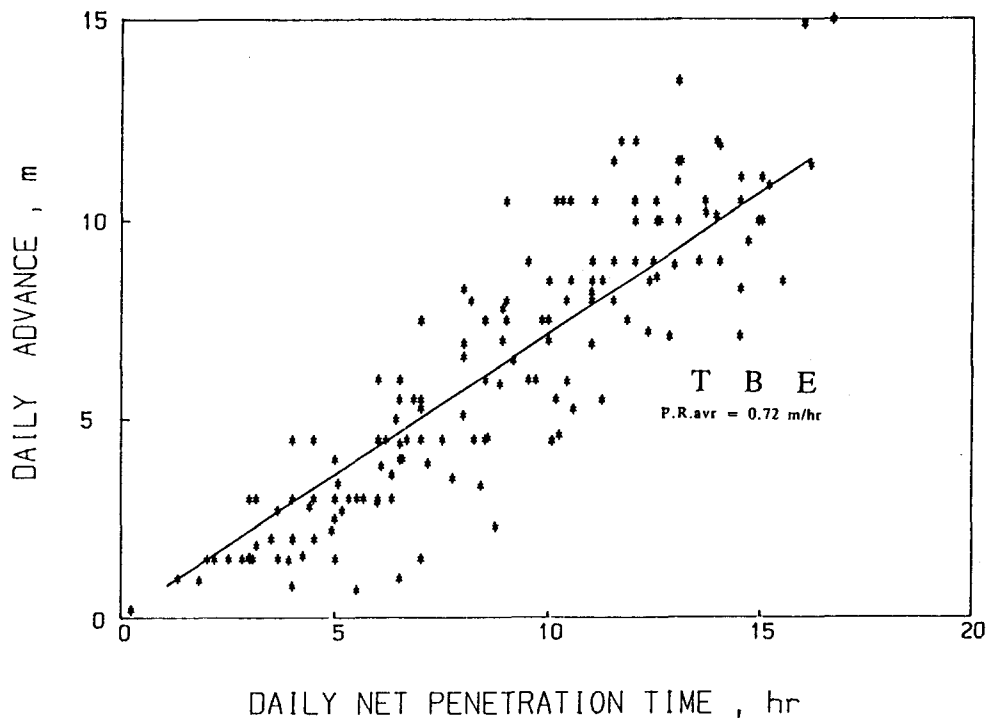


Fig. 8 Relationship between daily net penetration time and advancing distance in TBE

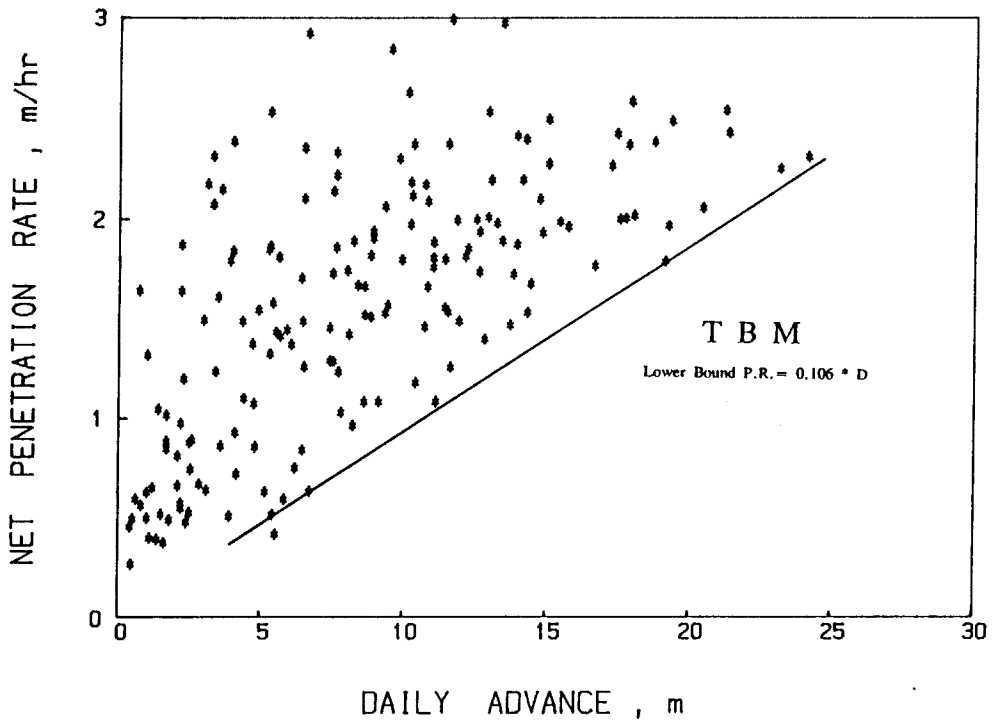


Fig. 9 Relationship between daily advancing distance and net penetration in TBM

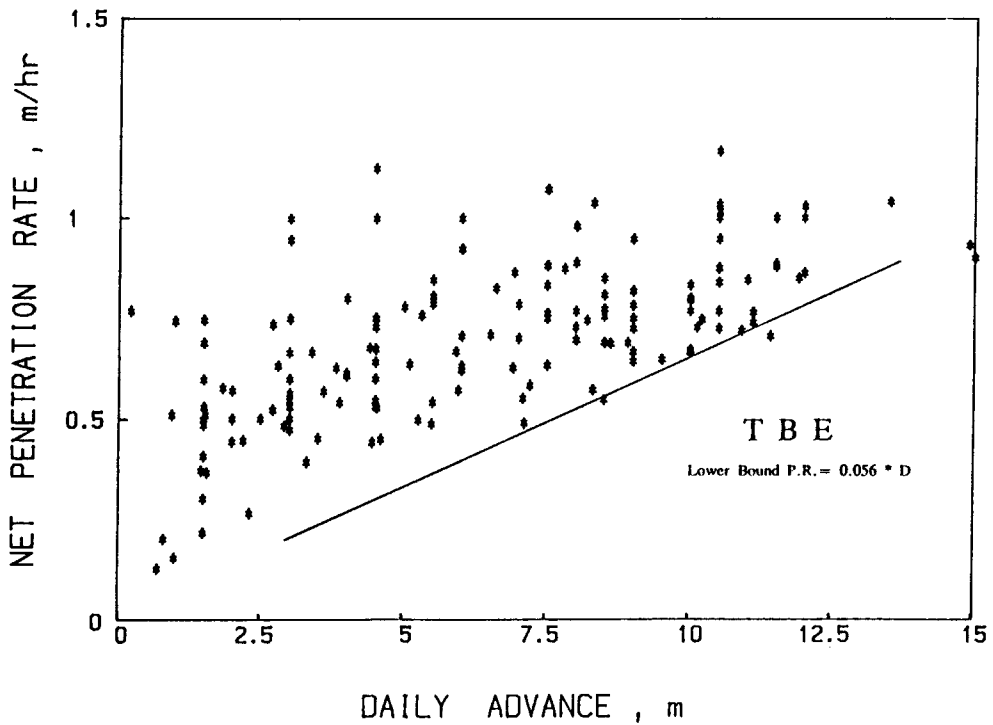


Fig. 10 Relationship between daily advancing distance and net penetration rate in TBE

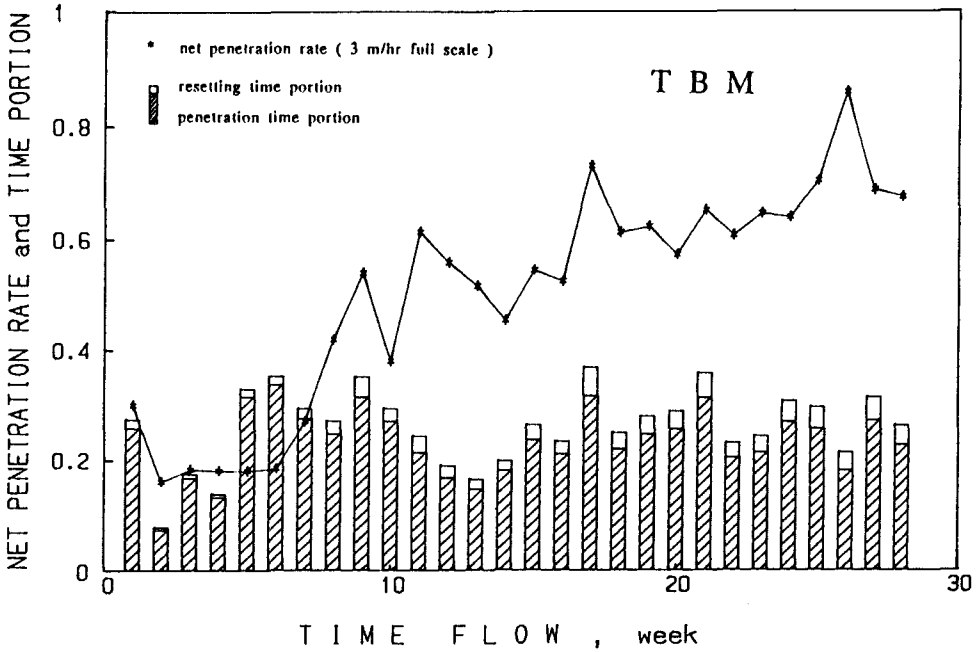


Fig. 11 Weekly data analysis of net penetration rate, resetting and net penetration time portion in TBM

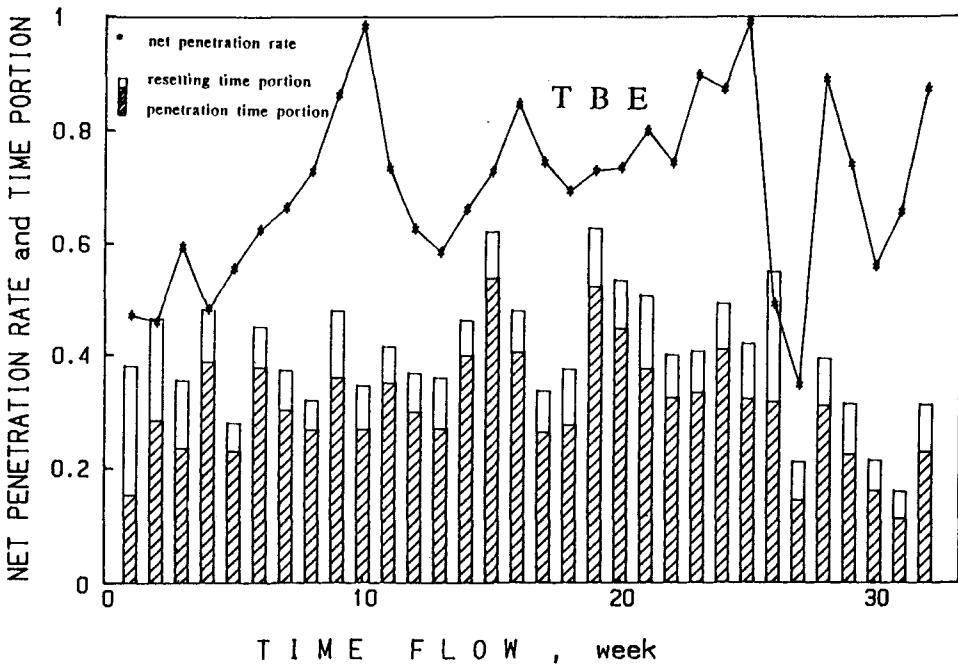


Fig. 12 Weekly data analysis of net penetration rate, resetting and net penetration time portion in TBE

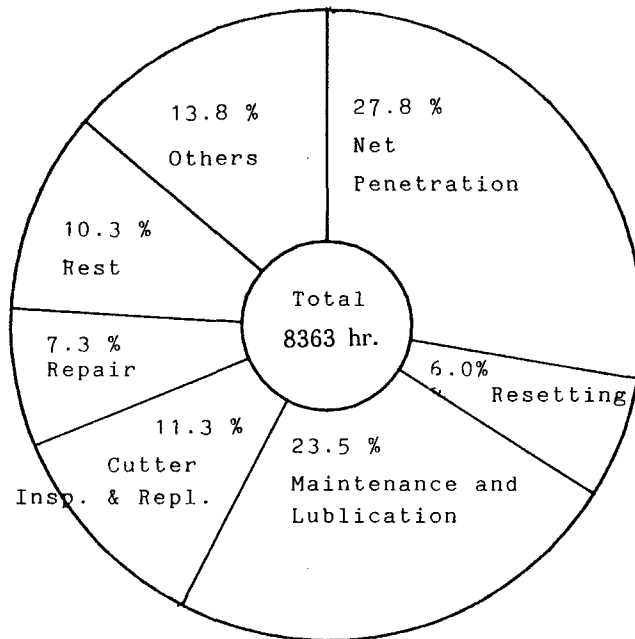


Fig. 13 Time portion diagram of TBM/TBE tunnelling in Namsan Roadway

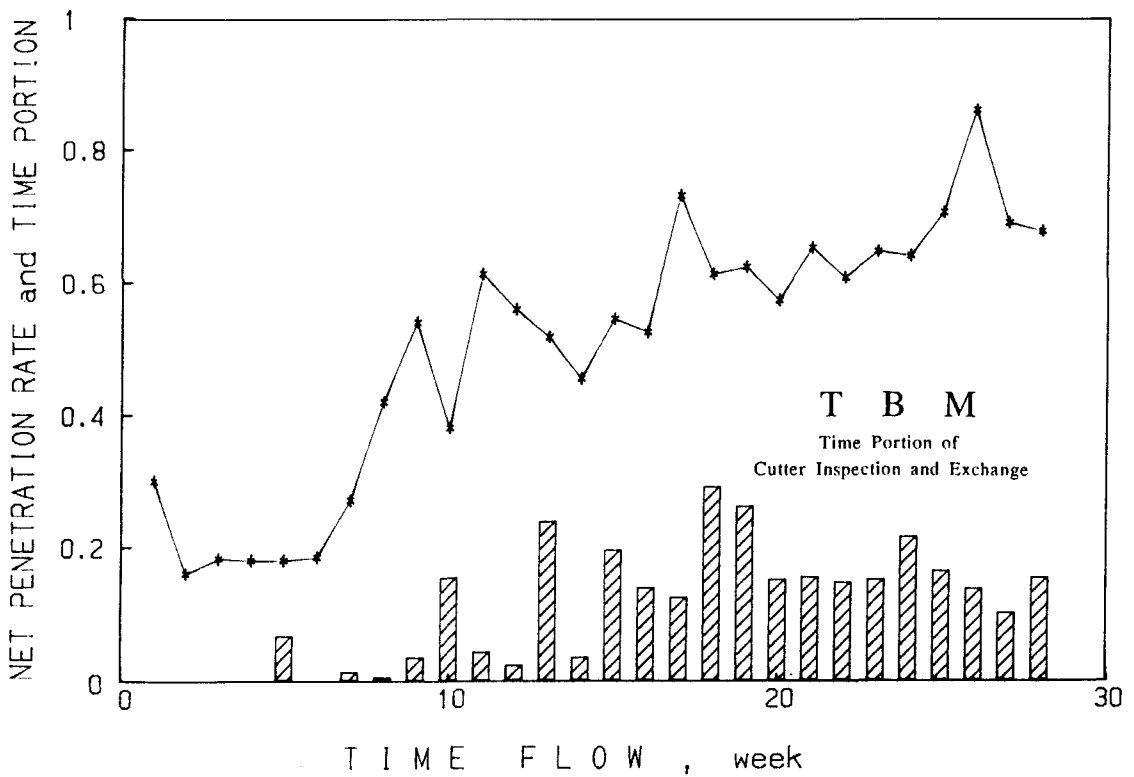


Fig. 14 Weekly variations of net penetration rate and cutter inspection and exchange time portion in TBM

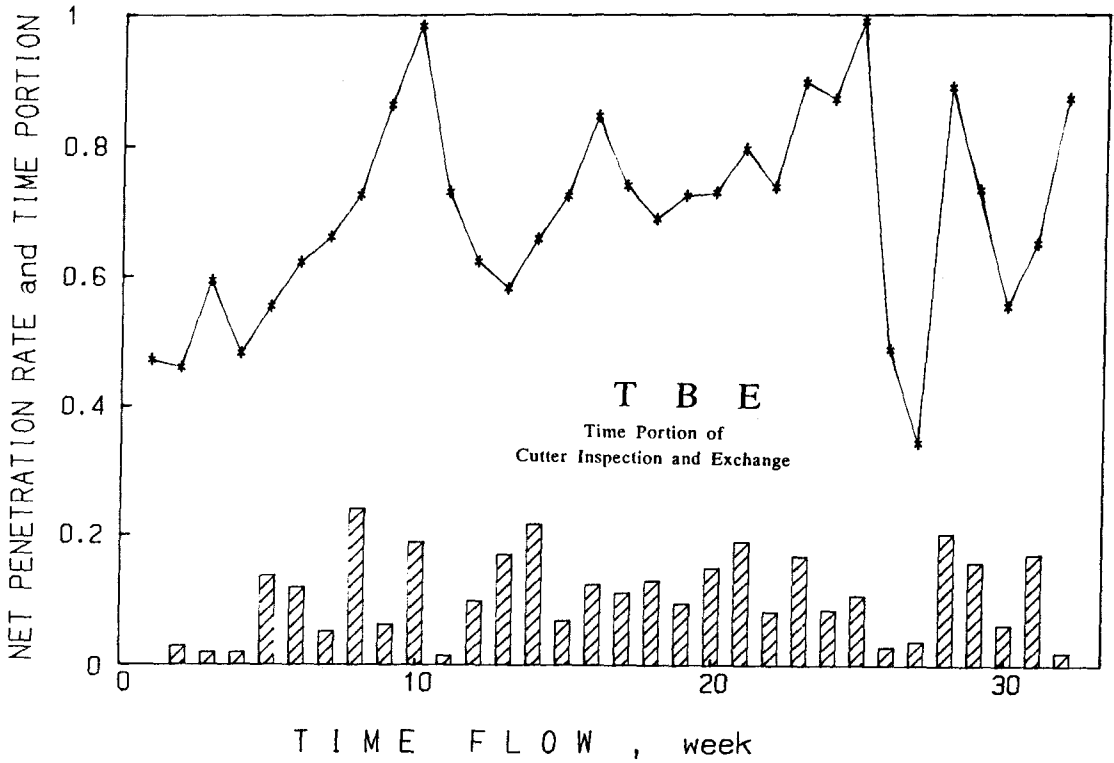


Fig. 15 Weekly variations of net penetration rate and cutter inspection and exchange time portion in TBE

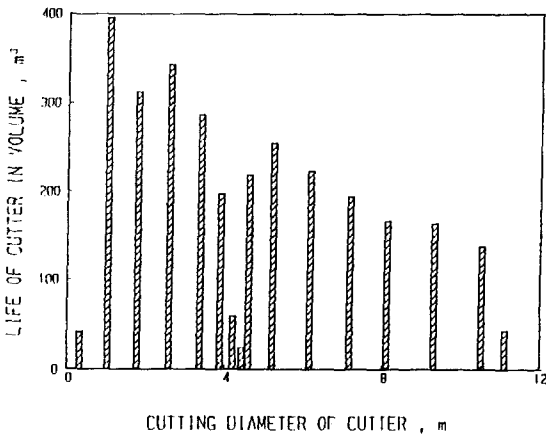


Fig. 16 Average life of cutter in advancing distance in TBM/TBE tunnelling

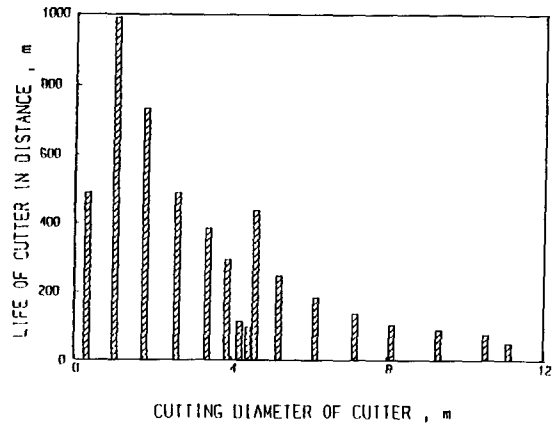


Fig. 17 Average life of cutter in excavation volume in TBM/TBE tunnelling

커터의 평균수명을 굴착량과 굴착거리로 표현한 것이다. 여기서 커터의 궤적직경이 4.5m 이하인 것은 TBM, 그 이상인 것은 TBE 장비에 의한 굴착자료이다.

굴착량으로 표시된 그림16에서 Center Cutter와 Gauge Cutter의 수명은 Normal Cutter의 평균수명에 비하여 극히 작음을 알 수 있다. 또한 TBM의 Normal Cutter의 평균수명은 TBE보다 약 1.6배 큰 것으로 해석되었다. 이러한 이유는 커터의 간격에 기인된 것으로 판단되며 앞으로 연구되어야 할 분야이다. 특히 외국제품을 수입하고 설계하면서 국내 암석의 특징을 어느정도 파악하고 고려했는가에 대하여 숙고되어야 할 것이다.

5. 결 언

남산1호터널과 평행하게 새로운 터널을 굴착한 본 공사는 도심에서는 처음으로 기계굴착공법을 적용하였다. 특히 단면의 직경이 11.3m로서 TBE를 사용하여 국내 굴착기술의 새로운 혁신을 가져왔다.

한남동 쪽에서 시작한 4.5m 직경의 Pilot Tunnel을 TBM으로 굴착하면서 확대굴착기를 사용할 사전자료를 충분히 얻어 큰 어려움이 없이 완성되었다. 즉 처음 350m 구간이 심한 균열로 인하여 낙반경험을 갖고 굴착속도가 크지 않음을 인지하여 TBE는 반대쪽에서 굴진하였으며 한남동 500m 구간은 발파에 의한 NATM공법으로 재설계하는 성과를 얻었다. 이로서 붕락사고를 줄임과 동시에 굴착기간을 약 4개월 단축하였다.

기계굴착의 큰 장점인 굴착속도를 해석한 결과 TBM에서는 1.62m/hr, TBE에서는 0.72m/hr로 나타났다. 이를 일굴착량으로 계산하면 6.8~8.4m 및 4.5~6.3m이다. 재래식 방법에서 일굴진량을 1.5m라고 할 때 4~5배 큰 것으로

결론지을 수 있다.

기계굴착의 굴착속도는 매일이나 주간의 작업시간과 작업량에 거의 무관한 것으로 판명되었으나 굴착량이 많을수록 굴착속도의 최소치는 뚜렷이 나타났다. 이의 관계계수는 TBM 및 TBE에서 각각 0.106과 0.056으로 해석되었다. 두 장비의 굴착속도 분석결과 TBE의 능력은 TBM에 비하여 약 1.8배인 것으로 결론지을 수 있다.

굴착장비의 운영비 중에서 상당한 비율을 갖는 커터의 소모량 해석결과 Normal Cutter의 평균수명은 TBM에서 310m³, TBE에서 194m³으로 나타났다. 또한 Center 및 Gauge Cutter의 수명은 약 45m³로 해석되었다. TBM에서 커터의 평균수명이 TBE에 비하여 1.6배 정도로 판명되었으나 이는 두 장비의 커터간격에 의한 것으로 판단되어 앞으로 도입될 기계장비의 설계에 지침이 될 것이며 정확한 적정간격을 얻기 위하여는 많은 연구가 요구된다.

참 고 문 헌

1. 박철환 외 (1991년) 전단면터널 굴착기술 개발연구, 과학기술처 KR-91-B15
2. 김길수 (1990년) 남산1호터널 공사보고, 대한토목학회지 제38권 제5호
3. 진로건설주식회사 (1990년) TBM공법, 46p.
4. 유로실업주식회사 (1990년) 암반에서의 터널굴착, 63p.

論 文 投 稿 規 定

1. 논문의 투고자는 본회 회원에 한함을 원칙으로 한다. 다만, 회원과 공동 집필인 경우에는 비회원도 포함될 수 있다.
2. 원고는 본지에 투고하기 전에 다른 간행물에 발표되지 않은 것을 원칙으로 한다.
3. 원고는 국문이나 영문으로 작성할 수 있다.
4. 국문으로 작성된 원고는 영문으로, 영문으로 작성된 원고는 국문으로 내용의 개요를 기술하여 본문 앞에 놓아야 한다.
5. 원고의 분량은 인쇄된 지면으로 10페이지 이내를 원칙으로 한다.
6. 원고는 원고지에 작성하거나 word processor로 작성하되, 그림, 사진, 표는 원고속에 삽입할 곳을 표시하고 별지에 작성한다.
7. 그림의 원본은 인쇄할 수 있도록 깨끗이 작성하여야 한다.
8. 인용문헌은 본문에 인용된 번호순으로 본문끝에 나열하며 저자명, 연도, 제목, 잡지명(단행본인 경우 출판사명), 권, 페이지의 순서로 작성한다.
9. 원고는 3부를 제출한다.
10. 논문의 별쇄는 30부를 필자에게 제공한다.
11. 투고된 논문은 편집위원회에서 각 분야 전문가에게 심사를 의뢰한다. 심사된 의견은 편집위원회에서 심의하여 게재여부를 결정한다. 심사결과, 원고의 수정을 요구할 수 있다.
12. 원고는 한국암반역학회 사무국으로 우송하여야 한다.
13. 기타 사항은 편집위원회에서 결정한다.