

## HARD ROCK에서의 T.B.M 공법 적용사례

박용운<sup>1)</sup> · 박흥조<sup>2)</sup>

A Case Study on the Application of T.B.M Tunnelling in Hard Rock  
Yong-Woon Park, Hong-Jo Park

### ABSTRACT

The application of T.B.M tunnelling has been progressively increased since the first entrance into Korea in 1985 and especially, its higher performance and safety is widely proved as a generalized tunnelling in hardrock tunnel construction, comparing with conventional method.

This case announcement will be much helpful for your general understanding of T.B.M tunnelling and the development of tunneling technology by introducing the brief methods and construction results from the actual application cases of T.B.M tunnelling in Ulsan Water Supply Tunnel Project, the longest tunnel in Korea under construction by YOU ONE. Co.

### 1. 서 론

국내에서 사용되는 터널공법으로는 지형, 지질, 현장여건 등에 따라 A.S.S.M, N.A.T.M, T.B.M, SHIELD, 개착공법(OPEN CUT)등이 있다. 그러나 보편적으로는 재래식, N.A.T.M 등이 사용되고 있으며 최근에 와서 각종민원, 노무비 상승으로 인한 공법의 기계화 추세에 따라 암반터널에서 T.B.M 공법이 다소 사용되고 있는 실정이다.

T.B.M 공법은 1985년 국내최초 도입된 이후 15개여 현장에서 총 굴진연장 103.4Km를 시공완료 또는 시공중에 있으며 특히 1990년 건설부 품셈이 재정됨에 따라 더욱 용도가 빈번해지고 있다. 암반터널에서 탁월한 굴진실적을 갖고 있는 T.B.M 공법의 이해를 높이고 본 공법을 더욱 발전시키는 계기를 삼고자 간단한 공법소개와 아울러 국내 최장대 도수터널인 울산공업용수 현장의 T.B.M 공법 적용 사례를 설명하고자 한다.

1) 유원건설(주) 대표이사 전무, 토목본부장, 토목시공기술사

2) 유원건설(주) 토목공사부장, 토목시공기술사

## 2. T.B.M 공법 소개

### 2-1. 공학적 개념

T.B.M에 의한 기계식굴착으로 암을 절삭굴착하므로 암반 이완영역 (0~30cm, N.A.T.M의 경우 30~70cm)을 최소화하여 암반역학적 개념을 최대로 활용하여 보조지보재 (SHOTCRETE, ROCK BOLT 등)를 대폭 줄임으로 굴착과 지보시간을 최소화한 고속 기계 굴진 공법이다.

### 2-2. 구조 및 기능

T.B.M은 크게 기계본체, 본체 트레일러, 버럭처리대차등 세 부분으로 구성되어 있으며 주요부분의 명칭과 기능은 다음과 같다.

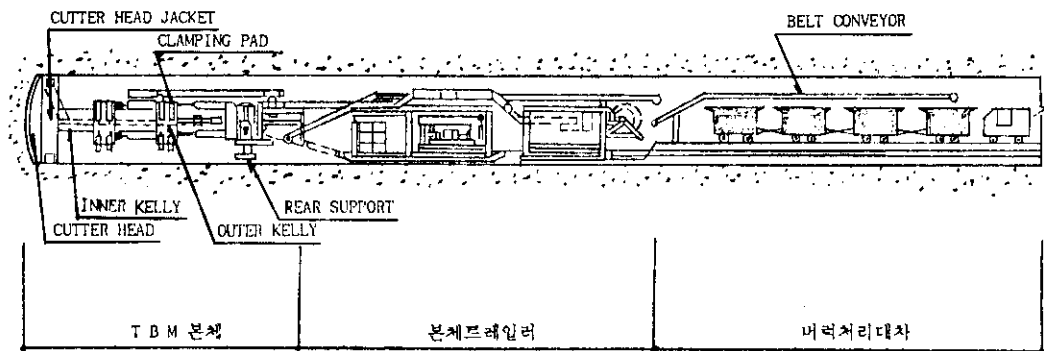


그림 1. T.B.M 주요부분 명칭

- 1) T.B.M 본체는 CUTTER HEAD, CUTTER HEAD JACKET, INNER KELLY, OUTER KELLY 등으로 구성되어 있다.
  - a. CUTTER HEAD : 암반굴착용 CUTTER가 배열 장착되어 있으며 굴착된 버럭을 본체 내부에 설치된 BELT CONVEYOR로 적재하는 역할을 하는 SCRAPER와 BUCKET가 장착되어 있다.
  - b. CUTTER HEAD JACKET : 터널 낙반시 SHIELD 역할을 하며 T.B.M이동시 전방지지대 역할과 굴진중 CUTTER HEAD를 지지하여 본체의 진동을 감소시키는 역할을 한다.
  - c. INNER KELLY : ADVANCE CYLINDER의 유압작동으로 CUTTER HEAD를 전진시키는 역할을 하며 CUTTER HEAD를 회전시키는 DRIVER가 부착되어 있다.

- d. OUTER KELLY : 굴착운행시 본체지지를 위한 CLAMPING PAD가 장치되어 있어 T.B.M 굴착시 터널 벽면에 압착지지하여 T.B.M을 굴착 전진시킨다.
- 2) 본체 트레일러는 운전대차, 유압대차, 동력대차로 구성되어 있다.
- a. 운전대차 : 기계본체를 조종할 수 있는 조종실이며 이곳에는 압질에 따라 기계의 추진력, TORQUE, 루과깊이 등을 조정할 수 있는 각종 계기들이 장착되어 있다.
- b. 유압대차 : 유압펌프, OIL TANK등이 장착되어 있으며 T.B.M 본체 작동을 위한 유압 공급원의 역할을 한다.
- c. 동력대차 : 변압기, CONTROL PANEL 장치, CABLE DRUM 등이 장착되어 있으며 T.B.M 본체의 동력공급원의 역할을 한다.
- 3) 버럭대차  
LOCOMOTIVE + MUCK CAR SYSTEM을 탑재하여 상부의 BELT CONVEYOR를 통한 버럭상차를 위한 대차이며 전면부에는 레일포설을 위한 레일설치 구간으로 구성되어 있다.

### 2-3. 굴착원리

THRUST에 의해 루과된 CUTTER에 CUTTER HEAD 회전에 의해 TORQUE가 가해지면 그림 2 에서 보는 바와 같이 압면 상부의 전단변형파손(SHEAR FAILURE)과 압면하부의 인장파손(TENSILE FAILURE)에 의해 폭 60~80m/m, 두께 10~40m/m 정도의 골재 상태로 파쇄된다.

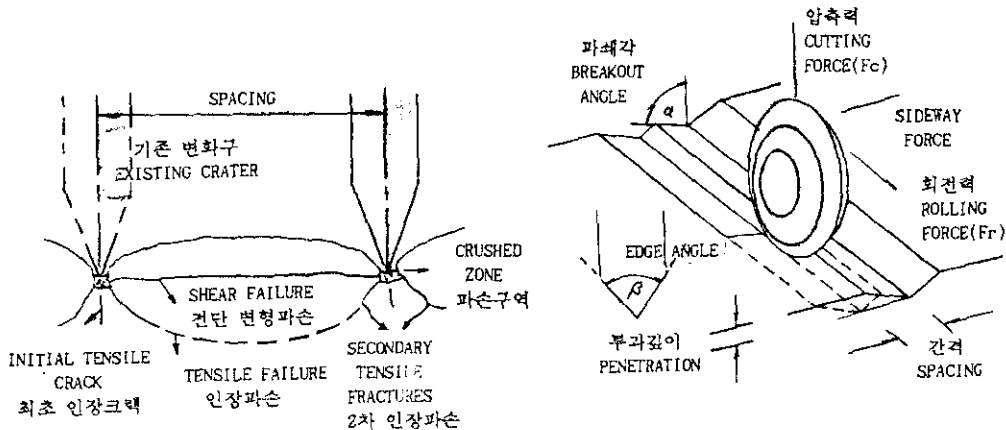


그림 2. 압쇄식의 굴착원리

## 2-4. 버럭처리 SYSTEM

T.B.M 공법에서의 버럭처리 SYSTEM은 MUCK CAR SYSTEM, 덤프트럭, BELT CONVEYOR를 이용하는 방법등 크게 세가지로 분류할 수 있으며 이들 방법의 적용은 터널의 구경, 연장등에 따라 경제적인 방법을 선택하여야 한다.

또한 이들 방법중 어느것을 선택하든 T.B.M 굴착에 LOSE TIME이 생기지 않는 SYSTEM 이어야 하며 개요도는 다음 그림과 같다.

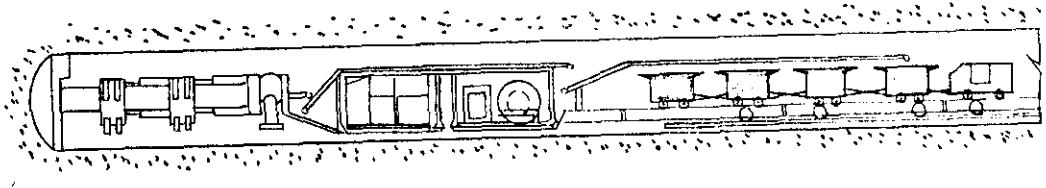


그림 3. 버럭처리 SYSTEM(MUCK CAR+LOCOMOTIVE)

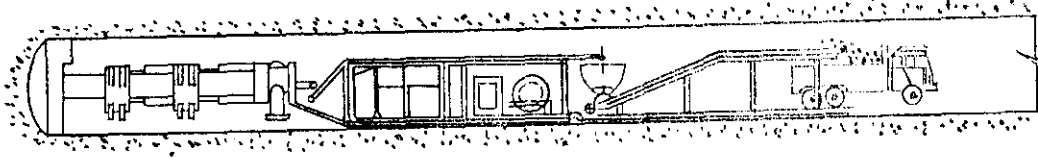


그림 4. 버럭처리 SYSTEM(덤프트럭)

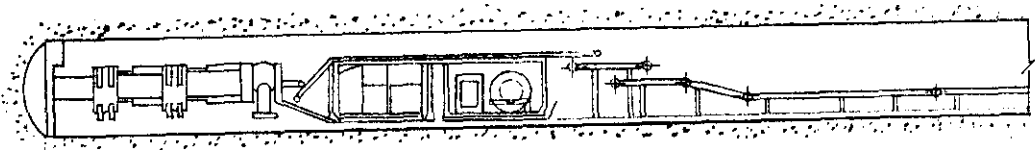
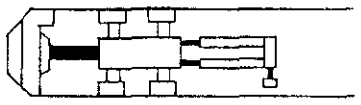
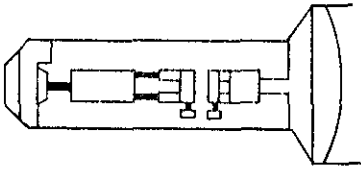
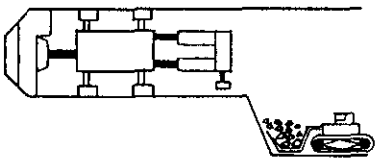


그림 5. 버럭처리 SYSTEM(BELT CONVEYOR)

## 2-5. 단면활용 방법

T.B.M을 이용한 굴착방법에는 전단면굴착방법과, PILOT 굴착후 T.B.E로 확대굴착 방법, PILOT 굴착후 확공발파하는 방법이 있으며 구경별 적용 빈도는 다음과 같다.

구경별 적용빈도 구경(m)	추정적용 빈도	공 법
적 2 6 10 14	25%~30%	전단면 T.B.M 
용 비 2 6 10 14	10%~20%	전단면 T.B.M + 확대형 T.B.E 
을 2 6 10 14	15%~18%	전단면 T.B.M + 발파 공법 

\* 외국실적임.

그림 6. T.B.M 활용방법

## 2-6. N.A.T.M 과 T.B.M 공법의 비교

구 분	N. A. T. M	T. B. M
1) 경 제 성	· 여굴발생, 지보다량 소요 · 장대터널시 작업경 필요 · 공사기간 과다로 간접비 상승	· 여굴 미발생, 지보재 절감 · 장대터널시 작업경 불필요 · 공사기간 단축
2) 안 전 성	· 화약발파로 인한 낙반사고 빈번	· 비발파 기계식굴착으로 낙반 사고 미발생
3) 환 경 성	· 갱내 환경 불량 · 발파진동 및 소음공해	· 갱내 환경 양호 · 무진동 무발파
4) 단면 및 선형	· 비 정 밀	· 정 밀

표 1. N.A.T.M 과 T.B.M공법의 비교

### 3. 울산공업용수 현장 시공사례

#### 3-1. 공사개요

본 공사는 낙동강에서 770,000ton/일의 용수를 취수하여 울산시 생활용수 및 공업용수를 공급하는 약 34km의 도수시설중 일부로서 양산군 상북면 소토리에서 청량면 중리의 회야댐을 잇는 도수터널 건설공사이며 터널 규모는 직경 3.5m(굴착경), L=22.5Km를 1990년 10월 착공하여 1994년 6월 완공예정으로 현재 터널 굴착이 완료 되었으며 CON'C 라이닝 타설작업이 시행중에 있다.

#### 3-2. 설계단계에서의 공법 검토

설계당시 본 PROJECT는 국내 최초의 최장 도수터널이었으므로 여러 측면에서 검토가 이루어졌다. 가장 경제적이고 합리적인 공법을 찾아야할 뿐 아니라 특히 주어진 목표년도에 완공하는 것이 관건이었다.

따라서 터널노선 선정시 지질조건, 굴착공법 등을 감안하여 아래 그림에서와 같이 2개 노선을 최종선정 하였으며 선정된 2개 노선에 대해 집중적인 비교검토가 이루어졌다.

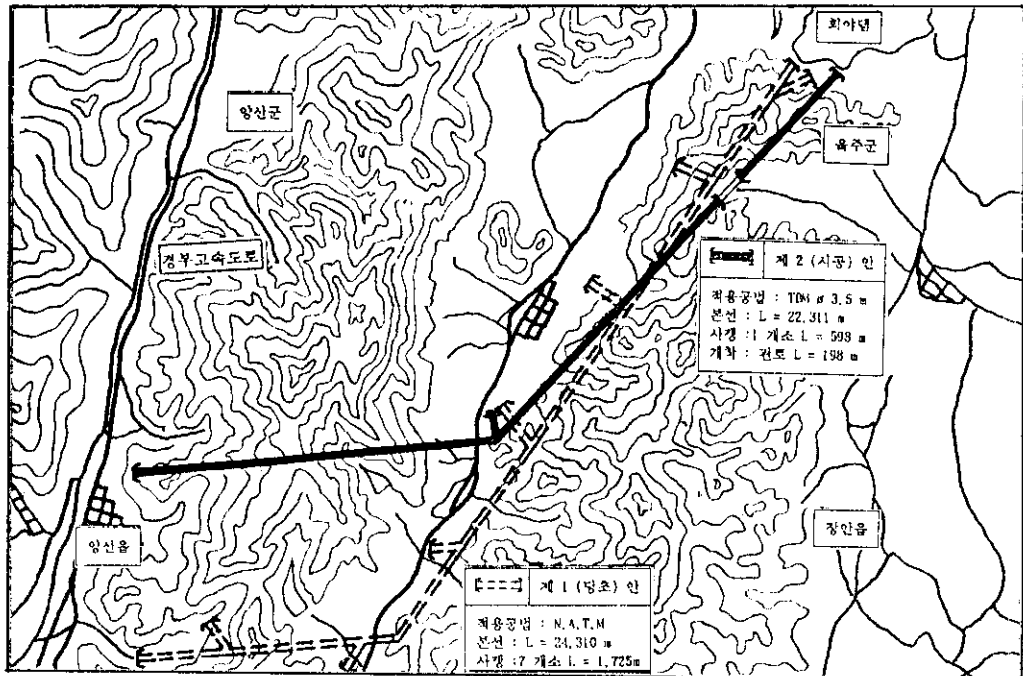


그림 7. 울산공업용수 터널 비교노선

제1안 노선은 양산을 명곡리에서 울산군 청량면 통천리를 잇는 노선으로 발파공법 적용을 감안 3~4km마다 사갱 설치가 가능한 우회노선이었으며, 제2안 노선은 T.B.M 공법을 감안한 노선으로 약 8~10km까지로 사갱이 필요치 않으므로 원효산을 관통하는 직선노선으로 검토하였다.

구 분	제 1 안	제 2 안	비 고
노선총연장	24.3km	22.3km	공사비는 계획 당시 공사비임.
사갱 길이	1,725m (7개소)	598m (1개소)	
공 사 비	641 억원	509 억원	
공사기간	57 개월	43 개월	

표 2. 노선비교표

표 2의 비교표에서 보는 바와 같이 제2안 노선이 공사비에서 유리할 뿐 아니라 사갱 건설에 따른 자연훼손의 측면에서도 유리하다는 판단과 목표년도에 완공가능한 안은 T.B.M을 사용하는 제 2안 밖에 없다는 결론을 지었다.

### 3-3. 시공현황

#### 3-3-1 굴착개요

본공사의 굴착을 위해 서독 WIRTH사가 제작한  $\phi 3.5m$  T.B.M 3대가 투입 되었으며 공기단축을 위해 T.B.M 진행 반대방향에서는 N.A.T.M을 병행하는 방법으로 시행하였다.

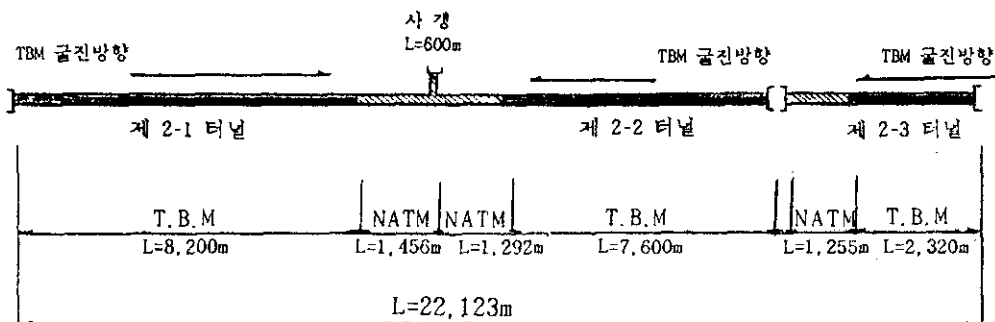


그림 8. 굴착개요

제 2-1, 제 2-2 터널구간은 T.B.M과 N.A.T.M이 양방향에서 동시 착공하였으며 T.B.M이 7.6~8.2km를, N.A.T.M이 약 1.9~2.0km를 굴착하였다. T.B.M이 약 4배정도 굴진속도가 빠름을 알 수 있다. 그리고 지금까지 알고 있는 바와 같이 N.A.T.M의 경제적 연장이 약 2km이내 임도 입증하고 있다.

### 3-3-2. 터널노선의 지질개요

본 지역은 백악기의 분출암류와 관입암류로 구성되는 화성암류가 주 분포를 이루고 퇴적암류가 부분적으로 분포하며 맥암류가 이들 암층을 부분적으로 관입한 양상이다. 특히 하부층에 해당하는 안산암질 암은 함각력 안산암에 의하여 직접 분출 피복되었고 함각력 안산암은 규장반암과 장석반암에 의하여 간접 피복되었음이 특징이며 부분적으로 맥암류가 이들 암층을 관입한 양상이다. 한편 양산단층대와 오복(동래)단층대가 거의 터널노선과 직교하며 그 파쇄폭이 매우 넓게 발달되어 있다. 터널노선의 지질분포를 살펴보면 양산측 터널입구를 기준으로 5.5km까지는 화강암, 그 이후 7.8km까지는 안산암이 나타나다 8.9km까지는 화강암, 그 이후는 안산암이 분포하고 있다.

#### CROSS SECTION

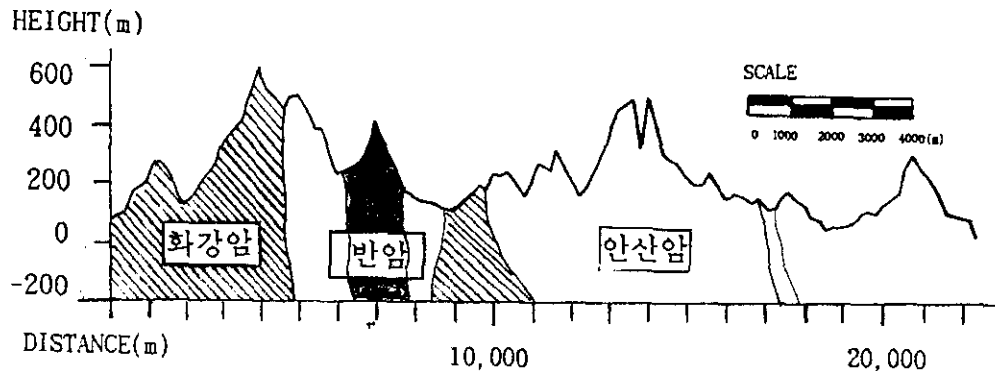


그림 9. 지질 분포도



### 3-3-3. T.B.M 굴착

본 터널의 T.B.M 굴진결과 2가지의 특징을 발견할 수 있었다. 첫째, 암종에 따른 석분량이 달랐으며 둘째, 암강도에 따른 T.B.M 굴착능력이었다. 안산암에서는 투과깊이(PENETRATION) 5m/m정도에 석분이 20~25% 정도 발생하며 화강암에서는 투과깊이 3m/m에 석분이 35% 정도로 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 암강도가 강할수록 석분량이 증가한다는 것을 보여주는 것이다. 한편 투과깊이와 관련하여 본 지역의 암강도는 안산암이 1400~1500kg/cm<sup>2</sup>이고 화강암이 1800~2000kg/cm<sup>2</sup> 정도로 추정 가능하다. 암강도에 따른 T.B.M 굴착능력은 일축압축강도 800~1500kg/cm<sup>2</sup>에서 가장 적응력이 우수한 것으로 나타났으며 월 450m 굴진실적을 나타냈으며 경암에서는 월 390m로 다소 굴진 능력이 감소하는 것으로 나타났다. 연암 파쇄부분에서 월 150m로 굴진 능력이 현격히 감소하는 것으로 나타났다.

결론적으로 T.B.M 공법은 보통암 이상의 암반에서는 굴진능력이 대단히 우수하였으며 지보가 많은 연암파쇄대 부분에서 굴진능력이 저하되는 것으로 나타났다.

본 현장의 전체적인 굴진실적은 표 3. 과 같다.

구 분	연 장 (m)	굴진기간 (월)	월평균 굴진장 (m)	일최대 굴진장 (m)	일최대 굴진장 (m)	암 종	비 고
2-1터널	8,190	27.1	302	604	44.4	화강암	파쇄대구간 작업지연 포함
2-2터널	7,590	25.2	301	586	42	안산암	단층대구간 작업지연 포함
2-3터널	2,220	5.2	427	702	42	안산암	
계	18,000	57.5	301				

표 3. T.B.M 굴진현황

### 3-3-4. 버럭처리

재래식 공법에서의 버럭처리는 굴착과 버럭처리시간이 별도로 산정되므로 버럭처리시간이 굴진능력에 가장 큰 제약요건이다. 그러나 T.B.M 공법은 앞에서 언급한 바와 같

이 굴착과 버럭처리가 동시에 이루어지므로 버럭처리 SYSTEM은 T.B.M굴착능력에 제한을 주는 요소가 있어서는 안된다. 특히 장대터널에서의 버럭처리 SYSTEM은 굴진 LOSE TIME 제거뿐만 아니라 터널내 작업환경을 고려해야 할 중요한 요소이다. 본 터널은 소구경 장대 터널이므로 DUMP TRUCK나 BELT CONVEYOR SYSTEM은 부적합 하였다. 따라서 MUCK CAR SYSTEM을 사용하였으며 갱내작업환경을 고려하여 견인력이나 속도면에서는 DIESEL LOCOMOTIVE보다 불리하지만 BATTERY LOCOMOTIVE를 적용하였다. 장비조합은 12ton급 BATTERY LOCOMOTIVE에 3.5㎡용 MUCK CAR 7량을 1편성으로 제 2-1 터널(L=8.2km)의 경우 4편성으로 운영하였으며 갱내 2개소(매 3km)에 RAIL SWITCHING POINT를 설치하여 MUCK CAR의 교행이 가능토록 하였다.

### 3-3-5. 지보처리

본 터널의 설계시 단면 TYPE은 그림 10 과 같이 5개 TYPE으로 설계되었다. 시공결과 TYPE별 연장은 제 2-3 터널처럼 연장이 짧은 터널에서는 당초설계와 거의 변화가 없었으며 제 2-1, 2-2 터널처럼 장대터널에서는 10%이상의 차이가 나타났다. 이것은 장대터널에서 새로운 기법의 지반조사의 필요성과 전문기관을 통한 T.B.M 공법의 지보에 대한 정량적 DATA 확보의 필요성이 제기되었다 할 수 있을 것이다.

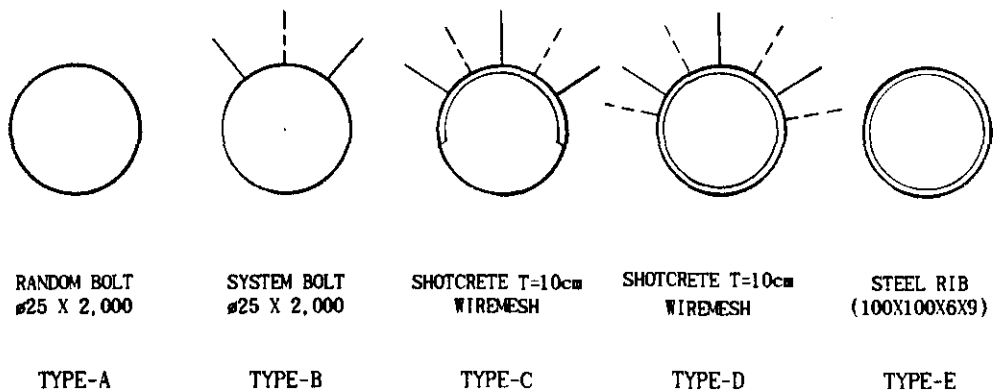


그림 10. T.B.M 지보방법

### 3-3-6. 가시설공

장대터널에서의 가시설 부분은 갱내의 작업환경, 안전측면, 원활한 터널 굴진을 위해서 매우 중요한 요소이나 지금까지 국내에서 장대터널의 시공경험이 별로 없어 자칫 소홀히 생각하기 쉬운 부분이다. 다행히 본 터널의 경우 이러한 부분들이 비교적 상세히 설계되어 있어 향후 고속전철건설등, 장대터널건설 활성화에 대비 본 터널에서의 가시설부분들을 소개하고자 한다.

#### 1) 환기설비

갱내 환기방법에서는 송기식, 배기식, 송배기식등이 있으나 본 터널에서는 소구경 터널에서의 단면활용도를 고려하여 송배기식 방법을 채택하였으며 또한 장대터널이므로 매 800m 마다 RELAY식으로 FAN을 배치하였다.

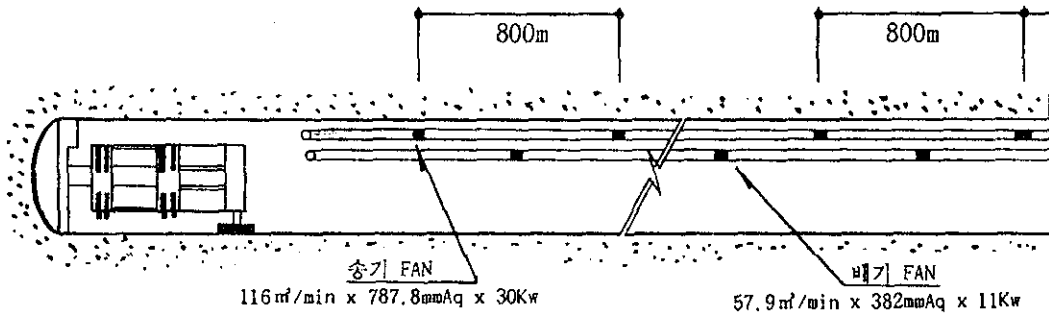


그림 11. 환기설비 개요도

#### 2) 배수설비

터널 종단 SLOPE가 0.07%이고 장대터널임을 감안 강제배수방법을 채택하였으며 매 400m 마다 배수 PIT를 설치하여 RELAY식으로 배수하는 방법을 사용하여 배수된 물은 갱외의 침전조에서 약품처리함으로 환경 오염에 유의하였다.

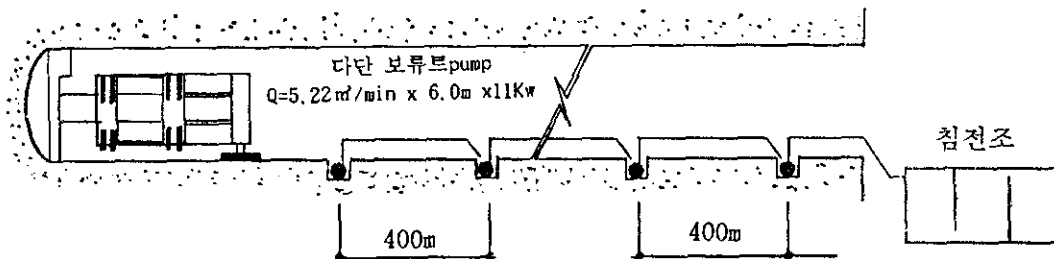


그림 12. 배수설비 개요도

### 3) 급수설비

CUTTER EA당 용수량은 5 l/min(9ton/hr)로써 1일 90ton이 소요된다. 본 현장에서는 급수원으로 심정(100ton/day)을 개발 사용하였으며 터널 입구에 물탱크(30m<sup>3</sup>)를 설치하여 가압용 BOOSTER PUMP(7.5kw)를 이용 갱내의 T.B.M에 공급하였다.

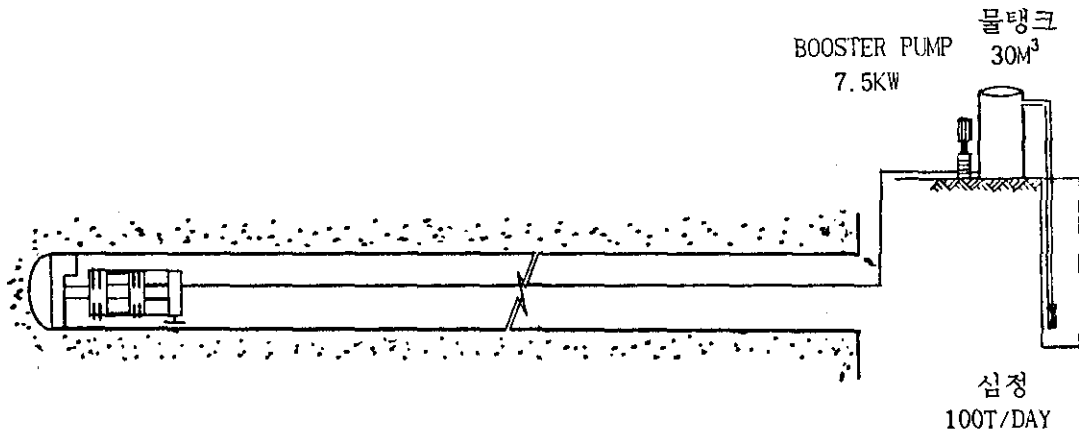


그림 13. 급수설비 개요도

### 4) 비상급기설비

비상급기설비는 초장대 터널에서 발생할 만약의 터널 낙반에 대비하여 갱내작업원에 대한 안전을 최대로 고려하였으며 갱구부에 AIR COMPRESSOR (750 CFM)를 설치하고 갱내 작업장까지는 STEEL PIPE(φ150m/m)로 연결하였다.

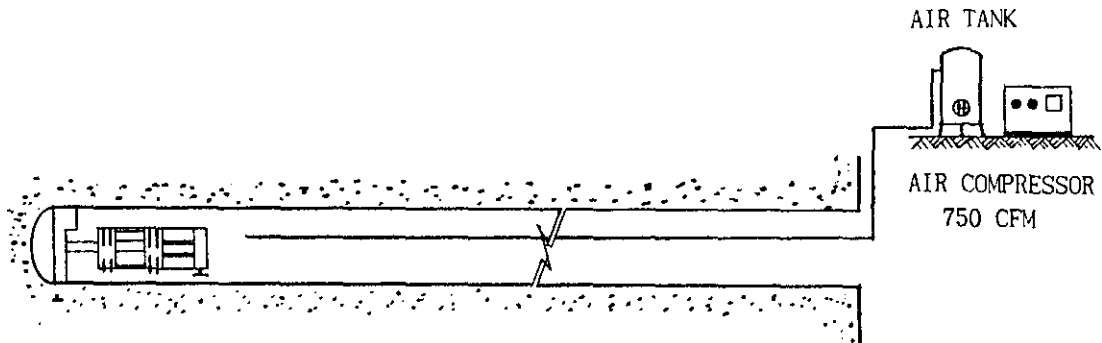


그림 14. 비상급기 개요도

5) 수전설비 및 T.B.M CABLE

T.B.M 및 부대시설공사의 전원공급은 한전으로부터 3ø4W 22.9KV의 고압 전력을 수전받아 갱구부에 설치된 변전소로부터 3ø3W 6.6KV로 강압하여 T.B.M 및 BACK-UP 설비 등에 전원을 공급하고 있으며 T.B.M 동력용 CABLE (3상 6.6KV 150mm<sup>2</sup>×3C)은 170m 간격으로 고압 CONNECTION BOX로 연결하여 T.B.M에 전원을 공급하고 있다.

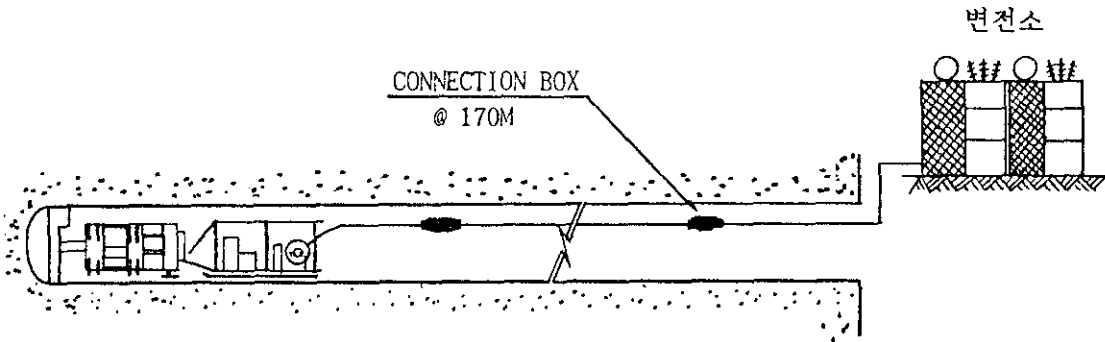


그림 15. 전기설비 개요도

3-4. T.B.M 굴진 분석

3-4-1. 굴진관리

T.B.M의 굴진관리는 OPERATOR가 작성한 24시간 동안의 전 작업과정을 수록한 DRILLING REPORT를 통계화하고 이것의 분석을 통해 LOSE TIME을 제거해나가는 기법으로 관리하였다. 이러한 과정을 통한 본 현장의 굴진분석표는 그림 16.과 같다.

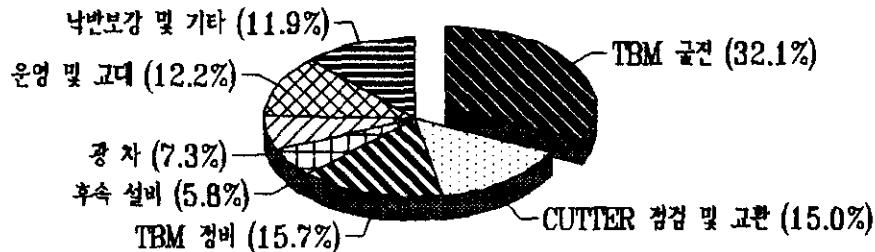


그림 16. T.B.M 굴진분석 DIAGRAM (제2-1 터널)

### 3-4-2 굴진 비교 분석

구 분	T.B.M 굴진	CUTTER 점검및 교 환	T.B.M 정비	후속 설비	광차 대기	운영 및 교대	낙반 보강및 기타	비고
울산공업용수 현장 제1공구	32.1%	15.0%	15.7%	5.8%	7.3%	12.2%	11.9%	
미국ATLANTA 수로터널현장	40.4%	25.6%	13.7%	10.6%	-	3.0%	6.7%	컨베이어 사용
일본 규야마 배수지공사	37.5%	9.9%	18.6%	4.4%	13.8%	9.3%	6.5%	
평 균	39.0%	17.8%	16.2%	7.5%	13.8%	6.2%	6.6%	

\* 위 굴진 비교 분석표에서 외국현장의 예는 여러 해외현장 굴진 DATA 중에서 가장 평균에 가까운 2개 현장의 실례임.

표 3. T.B.M 굴진 비교표

표 3. 에서 보면 본 현장의 T.B.M 굴진율이 32.1%로 외국의 평균 39.0%에 비해 6.9%가 낮으며, 운영 및 교대 6%, 낙반 및 보강은 5.3%가 높고 기타항목은 유사하다할 수 있겠다. T.B.M 굴진율은 암질에 따라 다르지만 본 현장의 경우는 운영 및 교대, 낙반 및 보강시간에 크게 좌우되었음을 알 수 있다.

굴진을 저하에 가장 큰 요인이었던 상기 2개항목에 대한 LOSE TIME을 제거하여 순굴진율 상승 가능분을 산정해 보기로 하자.

$$\text{운영 및 교대시간} : 12.2\% - 6.2\% = 6\%$$

$$\text{낙반 및 보강시간} : 11.9\% - 6.6\% = 5.3\%$$

계

11.3%

$$\text{순굴진율 상승 예상분} : 11.3\% \times 35\%(\text{순굴진 상승가능율}) = 4\%$$

위의 순굴진 상승가능을 35%는 전체시간에서 순굴진율이 차지하는 비율을 개략적으로 잡은 수치이며 11.3%의 LOSE TIME을 제거하여 T.B.M 굴진시간을 늘인다면 실질적인 순굴진을 향상은 약 4% 정도 기대된다는 뜻이다.

결국 T.B.M 굴진율은 암질뿐 아니라 T.B.M의 운영과 후속처리에 따라 크게 좌우됨을 알 수 있다.

#### 4. 결론

이상의 시공사례에서 보듯이 본현장에 T.B.M공법을 적용하므로 종래의 A.S.S.M이나 N.A.T.M에 비해 공사기간 면에서는 약 30%가 단축가능하였으며, 공사비 면에서는 약 25%가 절감되는 것으로 나타났다.

그리고 이러한 효과들은 T.B.M 운영방법개선, 기계굴착에 적합한 지보방법개선, 사전 정밀지질 조사와 이에따른 낙반의 사전처리방법 등이 개발된다면 굴진효율이 더욱 증대될 소지가 있음을 보여주고 있다.

결론적으로, T.B.M 공법은 HARD ROCK 에서는 괄목할 만한 성능을 발휘하고 있으나 보다 광범위한 지질에서 보편적 공법으로 사용하기 위해서는 본 공법을 시공하는 시공사에서는 지속적인 운영개선과 정량적 DATA화에 힘써야 할 것이며 학계 및 설계 분야에서는 기계적 굴착공법에 맞는 적합한 지보법의 개발과 정밀지질조사법에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

### 참고문헌

1. 유원건설주식회사 (1992), T.B.M 공법
2. T.NISHIDA, Y.MATSUMURA, Y.MIYANAGA & M.HORI (1982) ROCK MECHANICAL VIEWPOINT ON EXCAVATION OF PRESSURE TUNNEL BY T.B.M
3. 도화종합설계공사 (1990), 울산공업용수 PROJECT설계보고서 P17 - P41
4. 일본토목공학사편 , 산악터널공사 실례집