

# 암반터널에서의 TBM 공법 적용 사례 분석을 통한 운영 개선 방안

송용선<sup>1</sup>, 최재진<sup>1</sup>, 박홍태<sup>1\*</sup>

## A Study on the Operation Development Method through the Application Result TBM Tunneling in the Hard Rock

Young-Sun Song<sup>1</sup>, Jae-Jin Choi<sup>1</sup> and Hong-Tae Park<sup>1\*</sup>

**요 약** 현재, TBM 공법의 적용은 1985년 이래로 점진적으로 증가되고 있는 추세에 있다. 본 연구는 암반터널에서 탁월한 굴진실적을 갖고 있는 TBM 공법의 이해와 운영상의 발전을 위해서 TBM 공법을 적용한 시공 사례의 시간손실과 TBM 굴진장의 상관관계를 분석하였다. 그리고 분석결과를 기 분석된 미국, 일본의 운영현장의 결과값과 비교하여 TBM 굴진에 영향을 주는 요인을 분석하였고 그 분석결과에 따른 운영 개선 방안을 제시하였다. 따라서 본 연구에서 제시한 개선 방안은 향후 기본계획수립단계에서 TBM 공법 적용시 개략적인 지표로 활용할 수 있는 중요한 자료가 될 것으로 사료된다.

**Abstract** The application of TBM tunneling has been progressively increased since the first entrance into Korea in 1985. In order to an apprehension and operation development of TBM method which has excellent boring in hard rock tunnel, this study has analyzed mutual relation of lose time and TBM boring from actual construction result TBM tunneling. This study compared an analyzed result with TBM tunnelling construction results of Korea, America, Japan, analyzed a primary factor of TBM boring effect and suggested operation development method from the analyzed results. accordingly this study can be used an index when similar construction apply TBM method to planning steps.

**Key Words** : TBM method, TBM efficiency, TBM boring

### 1. 서론

#### 1.1 연구의 목적

현재, 국내에서 사용되는 터널공법은 지형, 지질, 현장 여건 등에 따라 ASSM, NATM, TBM, SHIELD, OPEN CUT 등이 활용되고 있다. 그러나 국내 터널공사는 주로 NATM이 사용되고 있으며, 최근에 와서 각종 민원, 노무비 상승, 공기단축 등으로 인하여 공법의 기계화 추세에 따라 암반 터널에서 TBM 공법이 다소 사용되고 있는 실정이며, 특히, 1990년 국토부(구, 건설부) 품셈이 제정됨에 따라 활용도가 더욱 증가할 것으로 판단된다.

한편, 최근 발표된 국제터널협회의 통계자료에 의하면 구미 등지에서 30%정도가 TBM 공법에의해서 시공되고

있으며, 국내에서도 1985년 국내에 처음 도입된 이후 다수의 터널공사에 적용하여 성과를 인정받고 있으나 일본, 미국 등과 비교해 볼 때, 효율적인 운영 측면에서 다소 미흡한 것이 사실이다.

따라서 본 연구에서는 기왕에 TBM 공법을 적용한 현장을 대상으로 TBM굴진, 낙반보강, TBM정비, Cutter 점검 및 교환, 기타항목(지연시간, 재설치, 운영 및 교대시간)의 작업공중에 대하여 효율성을 분석하고, 분석결과를 미국, 일본의 TBM 공법 적용 현장과 비교 분석하여 운영 개선 방안을 제시하는 데 그 목적이 있다.

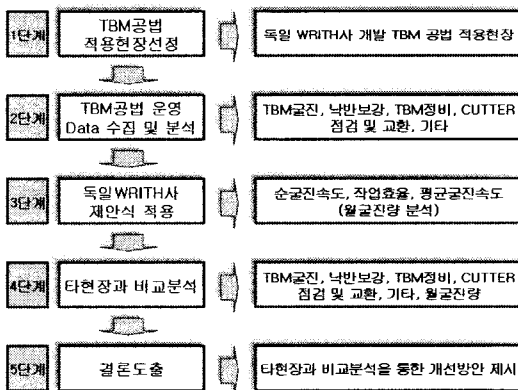
#### 1.2 연구의 동향 및 방법

TBM 공법의 효율성을 개선하기 위한 기존 연구동향

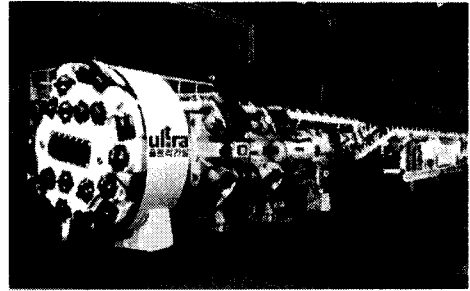
을 살펴보면, Hard Rock에서의 TBM공법 적용사례[1], 터널굴착에서의 TBM 공법 적용사례[2], Rock Mechanical Viewpoint on Excavation of Pressure tunnel by TBM[6] 등이 있다. 본 연구는 TBM 운영 분석대상 현장의 시공 운영 자료를 가지고 시간손실(lose time)과 TBM 굴진장의 상관관계를 분석하여 기존 연구와 비교 검토함으로써, TBM 운영시 시간손실을 줄이면서 굴진장을 증대시킬 수 있는 방안을 제시하고자 한다. 본 연구의 성과를 달성하기 위한 연구진행 흐름은 5단계로 구성되어 이루어지며, 그 내용을 설명하면 다음과 같다.

먼저, 대표적인 TBM 장비 개발사인 독일 WRITH社에서 개발하여 적용하고 있는 현장을 선정하여, TBM 굴진, 낙반보강, TBM 정비, Cutter 점검 및 교환, 기타 공중에 소요되는 시간을 분석하기 위하여 현장 Operator가 작업의 전과정을 수록한 Drilling Report를 통계화하여 이것의 분석을 통해 각 항목별로 차지하는 손실시간을 추적하고, 이 손실시간을 제거하여 TBM 굴진이 차지하는 시간과 비율 그리고 월굴진장을 분석하였다. 월굴진장은 본 연구의 분석현장에서 운영한 TBM 장비를 개발한 독일 WRITH社에서 제안한 표준식을 적용하여 순굴진속도, 작업효율, 평균 굴진속도를 각각 분석하였다. 또한 이 결과를 가지고 월굴진량(1일 18시간, 월 25일 기준, 독일 WRITH社 표준치[4])을 분석하였다.

이 분석결과를 조건이 유사한 일본, 미국의 주요 현장을 대상으로 분석한 결과치와 비교하여 그 효율성의 운영 개선 방안을 제시하였다. [그림 1]은 본 연구의 수행을 위한 연구의 흐름도를 나타내고 있으며, [사진 1]은 분석 현장에서 적용한 독일 WRITH社에서 개발한 TBM 장비의 전경을 보이고 있다.



[그림 1] 연구의 흐름도



[사진 1] 독일 WRITH社 개발 TBM 장비 전경

## 2. TBM 장비의 개념 및 공법 비교

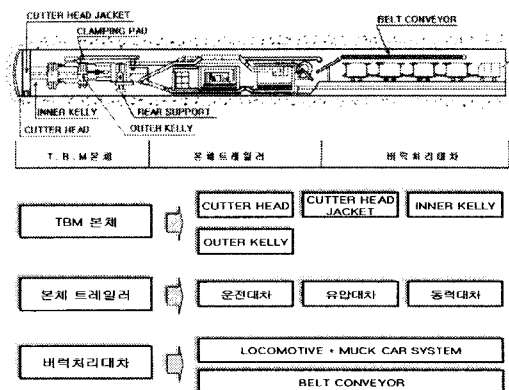
먼저, 연구의 방법에서 설명한 절차대로 수행하기 위한 선행단계로 TBM 공법의 이해를 돕기 위해 간략하게 TBM 공학적인 개념, TBM장비의 구조 및 기능, TBM의 단면 활용방법 그리고 국내에서 대표적으로 운영되고 있는 NATM과 TBM과의 비교 분석을 기술하였다.

### 2.1 공학적 개념

TBM 공법에 의한 기계굴착으로 암을 절삭 굴착함으로써 암반 이완영역(TBM : 0~30cm, NATM : 30~70cm)을 최소화하여 암반 역학적 개념을 활용하여 Shotcrete, Rock bolt, Wire Mash, Steel Rib 등의 보조지보재를 대폭 줄임으로 굴착과 지보시간을 최소화한 고속기계굴진 공법이다.

### 2.2 구조 및 기능

TBM 장비는 [그림 2]에서와 같이 크게 기계본체, 본체 트레일러, 버럭처리대차의 세 부분으로 구성되어 있으며, 주요 부분의 명칭과 기능은 다음과 같다.



[그림 2] TBM의 주요부분 명칭

**2.2.1 TBM 본체**

- (1) Cutter Head는 암반굴착용 Cutter가 배열 정착되어 있으며, 굴착된 버력을 본체 내부에 설치된 B딧 Conveyor로 적재하는 역할을 하는 Scraper와 Bucket이 정착되어 있다[6].
- (2) Cutter Head Jacket은 터널 낙반시 SHIELD역할을 하며, TBM 이동시 전방지지대 역할과 굴진 중에 Cutter Head를 지지하여 본체의 진동을 감소시키는 역할을 한다[6].
- (3) Inner Kelly는 Advance Cylinder의 유압작동으로 Cutter Head를 전진시키는 역할을 하며, Cutter Head를 회전시키는 Drier가 부착되어 있다[6].
- (4) Outer Kelly는 굴착운행시 본체지지를 위한 Clamp Pad가 장치되어 있어 TBM 굴착시 터널 벽면에 압착 지지하여 TBM을 굴착 전진시킨다[6].

**2.2.2 본체트레이더**

- (1) 운전대차는 기계본체를 조종할 수 있는 조정실이며, 이곳에는 암질에 따라 기계의 추진력, Torque, 투과깊이 등을 조정할 수 있는 각종계기들이 장착되어 있다.
- (2) 유압대차는 유압펌프, Oil Tank 등이 장착되어 있으며 TBM 본체의 작동을 위한 유압공급원의 역할을 한다.
- (3) 동력대차는 변압기, Control Panel 장치, Cable Erum 등이 장착되어 있으며, TBM 본체의 동력공급원의 역할을 한다.

**2.2.3 버력처리대차**

버력처리대차는 Locomotive + Muck Car System을 탑재하여 상부의 Belt Conveyor를 통한 버력상차를 위한 대차이며, 전면부에는 레일포설을 위한 레일 설치 구간으로 구성되어 있다.

**2.3 단면 활용 방법**

TBM을 이용한 굴착방법에는 전단면 굴착방법, Pilot 굴착 후 확대굴착방법, Pilot 굴착 후 확공 발파하는 방법이 있으며, 구경별 추정적용빈도는 외국의 경우, 전단면 굴착방법이 25-30%, Pilot 굴착 후 확대굴착방법이 10-20%, Pilot굴착 후 확공 발파하는 방법이 15-18%로 적용되고 있는 것으로 나타났으며[5], 본 연구는 전단면 굴착방법으로 운영된 현장을 대상으로 분석하였다.

**2.4 TBM과 NATM 공법의 비교**

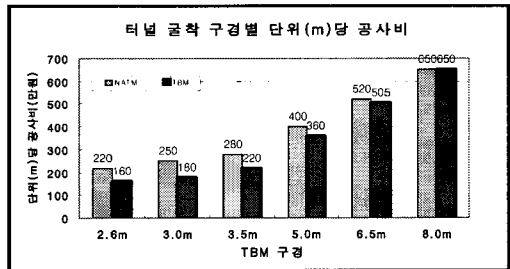
**2.4.1 일반적 측면**

TBM 공법과 NATM 공법의 우수한 특징[1]들은 다양하게 분류할 수 있으나, TBM공법을 경제성, 안정성, 환경성, 단면 및 선형 측면에서 NATM 공법과 비교해 볼 때, [표 1]과 같이 분류할 수 있다.

**2.4.2 공사비 측면**

TBM 공법과 NATM 공법의 터널 굴착 구경별 단위 (m) 당 공사비 측면에서 살펴보면, [도표 1]에서 보는 바와 같이 TBM 공법이 NATM 공법보다 적은 공사비가 소요되나 터널 구경이 커질수록 두 공법 모두 대등소이한 것으로 나타났다.

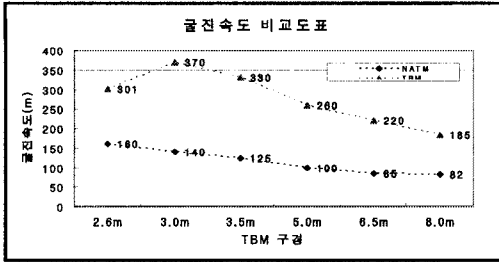
[도표 1] 터널굴착 구경별 단위당 공사비



[표 1] TBM과 NATM 공법의 비교

구 분	공 법	TBM	NATM
경 제 성		1. 여굴 미발생, 지보재 절감 2. 장대터널시 작업갱 불필요 3. 공사기간단축	1. 여굴발생, 지보다량 소요 2. 장대터널시 작업갱 필요 3. 공사기간 과다로 간접비 상승
안 정 성		1. 비발파 기계식굴착으로 낙반사고 미발생	1. 화약발파로 인한 낙반사고 빈번
환 경 성		1. 갱내 환경 양호 2. 무진동 무발파	1. 갱내 환경 불량 2. 발파진동 및 소음공해
단면 및 선형		1. 정밀함	3. 비정밀함

[도표 2] 굴진속도 비교



2.4.3 굴진속도 측면

TBM 공법과 NATM 공법의 터널 굴진속도 측면에서 살펴보면, [도표 2]에서와 같이 두 공법 모두가 터널 구경이 클수록 굴진속도는 반비례한 것으로 나타났으나, TBM 공법이 NATM 공법보다는 굴진속도가 상당히 높은 것으로 나타나고 있다[4].

위의 두 공법을 고려해 볼 때, 현장조건과 기술적인 측면이 모두 갖춰진다면, 암반에서 터널 굴착 구경별 단위당 공사비와 굴착속도 측면에서 NATM 공법보다는 TBM 공법을 적용하는 것이 유리한 것으로 판단되었다.

3. TBM 공법 굴진량 분석 이론

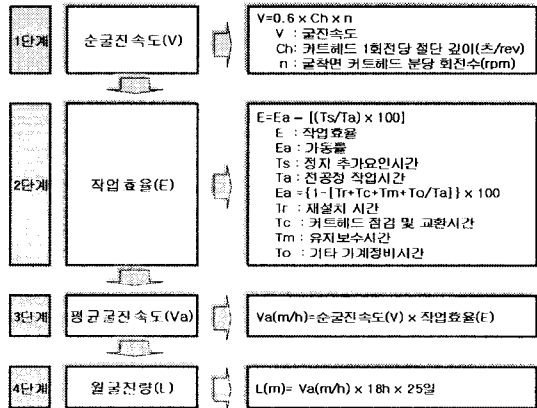
- (1) 단계 1 : TBM 공법의 현장적용에 있어서 TBM의 성능을 판단하는 첫 번째 요인은 순굴진속도이다. 순굴진속도는 Cutter Head의 굴착면 분당 회전속도와 Cutter Head 1회전당 절단해 들어가는 깊이와 일치함수관계이다. 또한 Cutter Head 1회전당 절단해 들어가는 깊이의 표준 Ch 산정 값은 [도표 2]와 같고[4], [그림 3]은 순굴진속도, 작업효율, 평균굴진속도, 월굴진장을 산출하는 과정을 도식적 절차로 보여주고 있다.
- (2) 단계 2 : TBM 공법의 현장적용에 있어서 TBM의 성능을 판단하는 두 번째 요인은 작업효율이다. 이것은 TBM의 가동률에도 영향을 받지만, 그것보다는 암반구조와 현장조건에 의해 결정된다. 그러나 TBM의 작업효율은 콘크리트 라이닝, 벽면 파쇄대, 자재공급 및 버력처리, 작업자의 숙련도 등의 요인에 의해 기계가 정지됨으로 감소하게 된다. 그러므로 가동률에서 이들 요인들을 제거하여 산출할 수 있다.
- (3) 단계 3 : TBM 공법을 적용하는 중요한 문제는 바로 평균굴진속도를 얻는 것이다. 평균굴진속도는 전공정의 작업시간당 굴진량이며, TBM의 성능이

라 할 수 있다. 이 평균굴진속도로 월굴진장과 월평균굴진장을 구할 수 있다.

- (4) 단계 4 : 한 현장에 TBM 공법을 적용함에 있어 효율성을 나타내는 대표 값이 월굴진량이다. 이 값은 평균굴진속도(m/h) 값에 독일 WRITH社에서 제시한 표준치 1일 18h, 월 25일을 기준으로 산출할 수 있다.

[도표 2] 표준 Ch값 산정표(독일 WRITH社 제시 표준치)

구분	일축압축강도(MPa) =N/mm <sup>2</sup>	Ch값	
		범위	적용
경압	130-150	0.27-0.32	0.30
보통압	100-130	0.32-0.38	0.35
연압	70-100	0.38-0.42	0.40
풍화압	50-70	0.42-0.47	0.45



[그림 3] 월굴진장 분석 흐름도

4. TBM 공법 운영현장 효율성 분석

TBM 공법의 OO운영현장의 효율성 분석은 터널구경 φ6.5m의 TBM 현장 운영자(Operator)가 작업의 전과정(총작업공기 10개월)을 수록한 Drilling Report를 통계화하여 이것의 분석을 통해 각 항목별로 차지하는 손실시간을 추적하고, 이 손실시간을 제거하여 TBM 굴진이 차지하는 시간과 비율 그리고 월굴진장을 분석하였다. 분석 항목은 타 현장에서도 동일하게 기록하는 TBM굴진, 낙반보강, TBM정비, Cutter 점검 및 교환, 기타항목 공중으로 구분하였다. 이들 분석항목들이 차지하는 시간과 비율을 가지고 앞 절에서 제시한 TBM 공법 굴진량 분석식을 적용하여 순굴진속도, 작업효율, 평균굴진속도, 월굴진장

과 월평균굴진장을 분석하였다.

#### 4.1 현장지질 및 운영 조건

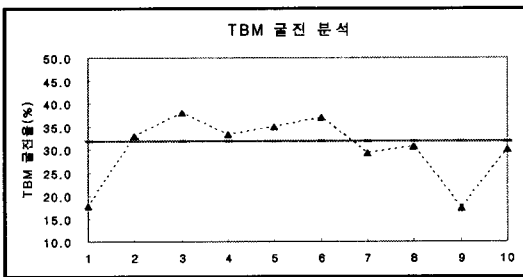
분석 현장의 지질은 일축압축강도 120~ 150MPa/mm<sup>2</sup>의 경암류가 주분포를 이루고 파쇄대와 퇴적암류가 부분적으로 분포되어 있었다. 굴착면 커터헤드의 분당 회전수 (rpm)는 7~8정도이며, 터널연장은 약 1500m, TBM 장비 제작사는 독일 WRITH社이며 구경은  $\phi$ 6.5m, 총작업소요 시간은 3599(h)이 소요되었다. TBM의 조립은 기술진 7명과 제작사의 기술진 1명으로 총 8명이 1팀을 구성하여 실시하였다. 투입장비는 크레인 90톤(1대), 유압보조장치(1대), 발전기 100kW(1대), 공기압축기(1대), 용접기 11kW(1대)가 투입되었다.

#### 4.2 분석현장 효율성 분석

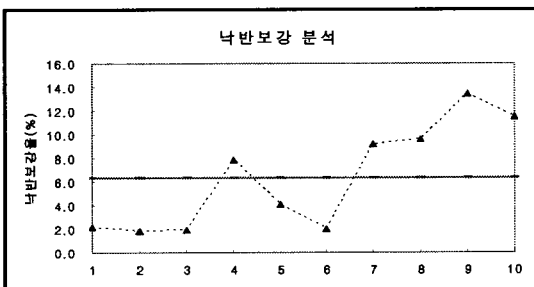
##### 4.2.1 공종별 분석

앞에서 언급한 조건을 대상으로 항목별 분석결과를 나타내면 [도표 3]-[도표 9]와 같다. TBM운영분석결과 전체소요시간 3599(h)중 실작업에 소요된 TBM 굴진시간은 1145.16h(31.8%)로 나타났다. 각 월별로 살펴보면, 월평균굴진율 31.8%보다 낮은 월은 1월(-14.1%), 8월(-1.1%), 9월(-14.4%), 10월(-1.8%)로 나타났다. 특히 1월은 준비작업, 지연시간 등으로 저조한 것으로 사료되며, 9월은 낙반보강에 많은 시간손실을 가져온 것으로 분석되었다.

[도표 3] TBM 굴진 분석

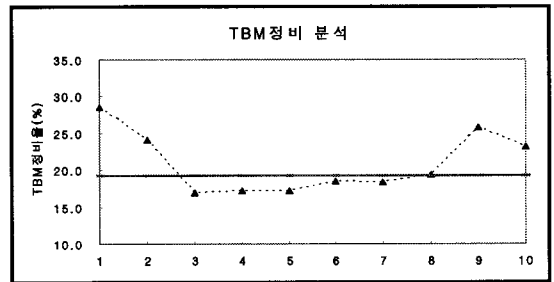


[도표 4] 낙반보강 분석

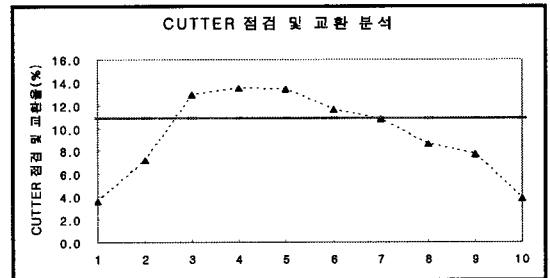


[도표 3]의 TBM 굴진율은 1월과 9월에서 평균치 31.8%보다 현저히 낮은 굴진율을 보이고 있으며, 나머지 월은 평균치에 근접하거나 상회하는 것으로 나타났다. [도표 4]의 낙반보강률을 참조하면 4월, 7월, 8월, 9월, 10월에서 평균치보다 높은 낙반보강률을 보이고 있다. 이 낙반보강률이 높을수록 시간손실이 증가하여 상대적으로 TBM 굴진율을 감소시키는 주요 원인이 된다.

[도표 5] TBM 정비 분석



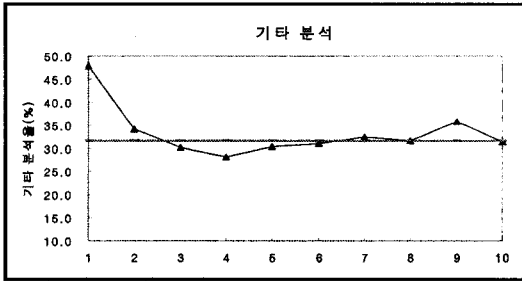
[도표 6] Cutter 점검 및 교환 분석



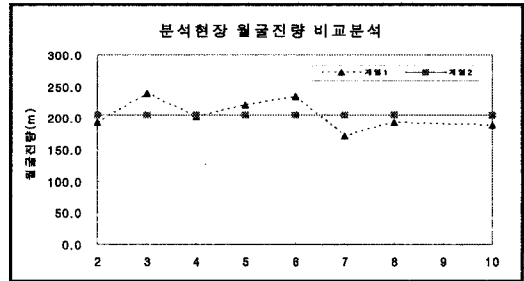
[도표 5]의 TBM 정비율을 참조하면 공사초기 1, 2월과 공사말기 9월과 10월에 높은 비율을 점하고 있었다. 분석현장의 경우, 공사초기와 공사말기에 시간손실률을 줄여준다면, 상대적으로 TBM 굴진율을 증대시킬 수 있다. [도표 6]의 Cutter 점검 및 교환율을 참조하면 공사초기와 공사말기에 현저히 낮은 비율을 나타내고 있지만, 3월, 4월, 5월에 높은 비율을 차지하고 있다. 이 결과로 볼 때, 공사착공 후 일정시간이 경과함에 따라 Cutter 점검과 교환이 필요한 것으로 판단된다. 이 시점을 잘 추적하여 시의적절히 대비한다면, 손실시간을 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

[도표 7]의 기타(현장지연, 운영 및 교대시간, 재설치 등)에 소요되는 비율을 참조하면, 현장지연, 준비 등으로 인해 공사초기에 증가했으며, 나머지 월에는 일정한 비율로 유지되고 있음을 보여주고 있다.

[도표 7] 기타 분석



[도표 9] 월별 굴진량 비교분석(1월,9월 제외)

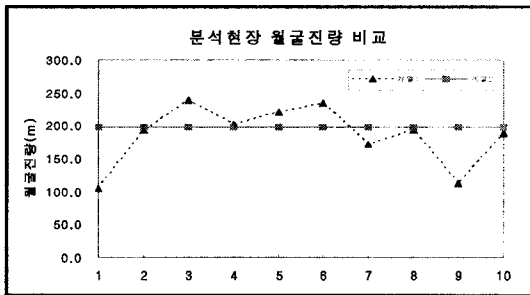


### 4.2.2 굴진장 분석

앞 절의 분석결과에서와 같이, TBM 굴진을 제외한 나머지 공종의 비율이 높을수록 시간손실이 크다는 것을 의미하며, 궁극적으로 이들 지표를 줄여줌으로서 TBM 굴진율을 향상시켜 TBM 굴진장을 증대시킬 수 있게 된다.

따라서 이들 공종에 대한 시간손실을 최소화 하는 방법을 강구하는 것이 TBM 공법의 운영을 향상시킬 수 있는 방안이 된다.

[도표 8] 월별 굴진량 비교분석



[그림 3]에서 제시한 분석 식을 적용하여 TBM공법 분석현장의 전공사시간 월평균굴진장은 198.0m로 분석되었다. 이 분석된 수치를 도식화하기 위하여 [도표 8]과 [도표 9]로 제시하였다.

[도표 8]은 월별 굴진량 비교분석 도표로 월평균굴진장은 198.0m로 나타났으며, 대부분의 작업월굴진량이 평균치에 접근해 있으나 1월 103.5m와 9월 112.5m는 평균치보다 매우 낮은 굴진장을 보이고 있다. 이러한 이유는 공사착수시점에서의 공사준비, 민원, 현장지연, 운영 및 교대시간, 재설치 등의 요인들이 작업손실을 가져왔음을 알 수 있다. 따라서 기본계획수립단계에서의 철저한 준비와 공사 중에 발생하는 파쇄대 등에서 낙반보강 등의 방법을 개선한다면 보다 높은 TBM 굴진율을 향상시킬 수 있을 것으로 판단되었다.

또한, [도표 9]는 월평균굴진장보다 현저히 낮은 1월 103.5m와 9월 112.5m를 제외하여 월평균굴진장을 산출해보면 206.0m로 산출되었다.

## 5. TBM 공법 효율성의 비교 분석을 통한 운영 개선 방안

### 5.1 타 현장과의 비교 분석

본 연구에서 분석한 OO현장의 TBM굴진(1145.16h, 31.8%) 낙반보강(226h, 6.3%), TBM정비(696.16h, 19.3%), Cutter 점검 및 교환(391.16h, 10.9%) 기타(1140.49h, 31.7%) 항목의 분석 값을 미국의 Atlata 수로 터널현장과 일본의 규야마 배수지공사현장에서 분석한 값과 비교 및 분석을 하였다.

[표 2]는 본 현장의 조건과 유사한 미국의 Atlata 수로 터널현장과 일본의 규야마 배수지공사현장의 굴진 비교 분석 자료로서 여러 해외현장 굴진 Data 중에서 가장 평균치가 가까운 두 개 현장의 실례이며[1], TBM굴진, 낙반보강, TBM정비, Cutter 점검 및 교환, 기타 항목에 대하여 이들 2현장에서 분석한 결과와 평균치를 나타내고 있다.

외국 두 현장의 각 분석항목별 소요시간의 평균치는 TBM굴진(39.0%) 낙반보강(17.8%), TBM정비(16.2%), Cutter 점검 및 교환(6.6%) 기타(20.6%)를 나타내고 있으며, 이 결과값을 본 연구에서 분석한 현장의 소요시간 수치와 비교해 보았을 때, 분석 현장의 TBM정비와 기타(현장지연, 운영 및 교대시간, 재설치 등)에서 3.1%와 11.1%의 높은 시간 손실율을 보이고 있었다.

TBM 굴진율은 구경이 같은 조건에서 암질에 따라 다르게 나타날 수 있지만, [표 3]에서와 같이 본 현장의 경우 TBM 정비와 기타(현장지연, 운영 및 교대시간, 재설치 등) 시간에 크게 좌우됨을 알 수 있다. 타 현장과 비교해 볼 때, TBM 굴진율 저하에 가장 큰 요인이었던 상기

두개 항목에 대한 시간손실을 제거하여 TBM 굴진을 상승가능예상분을 산정해 볼 수 있었다. 이 결과는 [표 4]과 같으며, 산출근거는 TBM 정비 3.1%와 기타항목 11.1%로 합계 14.2%의 시간손실을 가져왔다. 따라서 TBM 굴진 상승예상율은  $14.2\% \times 0.318 = 4.5\%$ 가 되고 상승예상분의 월평균굴진장은  $198.0 \times 0.045 = 8.9\text{m}$ 가 되며, 상승예상분을 고려한 월평균굴진장은  $198.0 + 8.9 = 206.9\text{m}$ 가 된다.

이와 같이 14.2%의 시간손실을 제거하여 TBM 굴진시간을 늘인다면 실질적인 순굴진을 향상은 약 4.5% 정도가 기대된다. 즉, 4.5%를 고려하면 198m에서 206.9m로 증가됨을 알 수 있다. 결국 TBM 굴진율은 암질뿐 아니라 TBM 운영에 따라 크게 좌우됨을 알 수 있었다.

다음은 분석현장과 WRITH社의 표준치와 월평균굴진장을 비교해 보면, 터널현장의 암질에 따라 다르지만, 분석현장과 WRITH社의 표준치는 각각 198.0m와 220.0m[4]를 나타내고 있다. 독일 WRITH社의 표준치와 비교해 보면, 약 22m의 월평균 굴진장이 낮은 것으로 나타났으며, 시간손실을 제거한 후 상승예상분을 고려한 월

평균굴진장 206.9m와 비교해도 13.1m의 월평균 굴진장이 낮은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 앞에서 언급한 TBM 굴진율은 암질뿐 아니라 TBM 운영에 따라 크게 좌우됨을 간접적으로 알 수 있었다. 또한, [도표 9]에서 월평균굴진장보다 현저히 낮은 1월 103.5m와 9월 112.5m를 제외하여 월평균굴진장을 산출해보면 206.0m로 산출되었다.

이 수치는 WRITH社에서 제시한 표준치 220m 보다 14m 정도 낮은 굴진장을 보이고 있다.

### 5.2 TBM 공법 운영 개선 방안

앞 절의 분석 결과에서와 같이 분석현장의 효율성이 비교 현장의 효율성에 비하여 전반적으로 낮은 수치를 나타내고 있다. 그 원인은 TBM 정비, 기타(현장지연+운영 및 대기+재설치) 항목에 소요되는 시간이 증가하였기 때문이며, 비교 현장에 비해 월평균 굴진량도 감소하게 되었다. 이것은 TBM 정비, 기타항목 공종인 현장지연, 운영 및 교대시간, 재설치 등에 소요되는 시간을 최소화함으로써 월평균 굴진속도를 향상시킬 수 있는 것으로

[표 2] 미국, 일본현장 굴진내용

구 분	TBM굴진(%)	Cutter점검 및 교환(%)	TBM정비(%)	낙반보강(%)	기타(%)	비고
미 국 Atlata 수로터널현장	40.4	15.0	15.7	11.9	25.3	기타 : 현장지연, 운영 및 교대시간, 재설치 등)
일 본 규야마 배수지공사현장	37.5	9.9	18.6	6.5	27.5	
평 균	39.0	17.8	16.2	6.6	20.6	

[표 3] 본 연구대상 현장과 미국, 일본 현장의 굴진내용 비교

구 분	TBM굴진 (%)	Cutter 점검 및 교환(%)	TBM정비(%)	낙반보강(%)	기타(%)	비고
(미국,일본) 평 균	39.0	17.8	16.2	6.6	20.6	
분석현장	31.8	10.9	19.3	6.3	31.7	
편 차	(+)7.2	(+)6.9	(-)3.1	(+)0.3	(-)11.1	

[표 4] 타 현장 비교분석을 통한 본 현장 굴진을 상승예상 분석

구 분	TBM정비 (%)	기타 (%)	분석현장			
			월평균굴진장 (m)	월평균굴진율 (%)	TBM 굴진 상승 예상율(%)	상승예상율을 고려한 월평균굴진장(m)
편 차	(-)3.1	(-)11.1	198	31.8	4.5%	206.9

나타났다. 따라서 국내 시공에 있어서도 TBM 운영방법 개선, 기계굴착에 적합한 지보방법개선, 현장지연방지, 사전 정밀지질 조사와 이에 따른 낙반처리방법 등이 개발된다면 시간손실을 최소화하고 굴진효율을 더욱 증대될 소지가 있음을 보여주고 있다. 다시 말해, TBM 공법은 Hard Rock 에서는 광범위한 성능을 발휘하고 있으나 보다 광범위한 지질에서 보편적인 공법으로 사용하기 위해서는 TBM 공법으로 시공하는 시공자는 지속적인 운영개선과 정량적인 Data화에 힘써야 할 것이며, 설계분야는 기계적 굴착공법에 맞는 적합한 지보법의 개발과 정밀지질조사법에 대한 연구가 중점적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

[표 5] 현장별 월평균굴진장 비교표

현 장	TBM 기종	암종	일축압축(MPa =N/mm <sup>2</sup> ) 강도	월평균 굴진장(m)
분석현장	독일(WIRTH사 φ 6.5m)	화강암	1300-1500	198.0(206.9)
WRITH社 표 준 치	독일(WIRTH사 φ 6.5m)	경암(40%), 보통암(40%) 연암(10%), 풍화암(10%)	-	220.0

## 6. 결론

분석현장의 한정된 자료를 분석한 결과를 가지고 보편적인 결과를 도출하기에는 다소 문제점이 있는 것으로 사료되나 기계식 굴착공법인 TBM 공법을 적용함에 있어 기본계획수립단계에서 계획을 수립하는데 개략적인 근거 자료가 될 수 있는 결과를 얻을 수 있었고 그 결과를 요약하여 기술하면 다음과 같다.

첫째, 독일 WRITH社에서 개발된 구경 6.5m를 운영할 경우, 일축압축강도 1200 ~ 1500 kg/cm<sup>2</sup>의 경암류가 부분포를 이루로 파쇄대와 퇴적암류가 부분적으로 분포되어 있는 현장에서 월평균굴진장은 198m이며, 상수예상분을 고려할 경우 206.9m정도 굴진할 수 있었다. 따라서 터널 구경 6.5m의 경우 월평균 굴진장은 약 198~207m 이상을 개략적인 수치로 규정할 수 있을 것으로 사료된다.

둘째, 외국의 경우 현장지연, 운영 및 대기, 재설치 등의 시간을 최소화함으로써 굴진속도를 향상시킬 수 있었던 것으로 나타났다. 국내 시공에 있어서도 굴진속도의 증대를 위해서 [도표 3]에서와 같이 TBM 공사의 초기와 말기에 시간손실이 많은 것으로 분석되었다. 따라서 시간

손실의 주원인인 낙반보강과 TBM 정비, 지연시간 재설치, 교대시간 등에 소요되는 시간손실을 줄여 줌으로써, 굴진속도를 증대시킬 수 있다.

이를 위해서는 TBM 운영의 주요 공종별로 사전작업관리를 일정별로 구분하여 확인, 검사, 승인 등의 체계적인 사전공정관리방법이 선행되어야 보다 효율적으로 운영될 수 있을 것이다.

또한, TBM 운영에 적합한 지보방법개선, 현장지연방지, 사전 정밀지질 조사와 이에 따른 낙반처리방법 등이 개발된다면 시간손실을 최소화하고 굴진효율을 더욱 증대될 소지가 있음을 보여주고 있다.

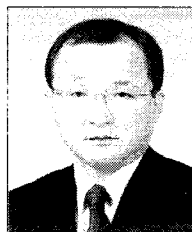
셋째, TBM 공법이 광범위한 지질에서 보편적인 공법으로 사용하기 위해서는 지속적인 운영개선과 정량적인 Data화에 힘써야 할 것이며, 기계적 굴착공법에 맞는 적합한 지보법의 개발과 정밀지질조사법에 대한 연구가 활발히 이루어져야 할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- [1] 박용운, 박홍조, HARD ROCK에서의 TBM공법 적용 사례, 한국지반공학회, 대한터널협회, 지하공간 건설에 대한 심포지움 논문집, 1996, pp 11-15
- [2] 이용일, 박홍조, 김도완, 허성룡, 터널굴착에서의 TBM 공법 적용사례, 1997, pp 1-14
- [3] 도화종합설계공사, 울산공병용수 PROJECT 설계보고서, 도화종합설계공사, 2000, pp 17-41
- [4] 유원건설, Tunnel Boring Machine Method, 유원건설, 1993, pp 1-20
- [5] David Marin, "Proven TBM's Turn Power up in Norway Tunneling," 1988, pp 41-51
- [6] T.nishida, Y.matsumura, "Rock Mechanical Viewpoint on Excavation of Pressure Tunnel by TBM" 1993, pp 12-17

## 송 용 선(Young-Sun Song)

[정회원]



- 1984년 2월 고려대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1988년 8월 충남대학교 대학원 토목공학과(공학박사)
- 1993년 8월 ~ 현재 공주대학교 건설환경공학부 교수

<관심분야>  
지반공학, 사면안정



**최 재 진(Jae-Jin Choi)**

[정회원]



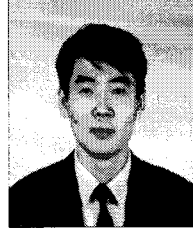
- 1984년 2월 한양대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1987년 2월 한양대학교 대학원 토목공학과(공학박사)
- 1992년 2월 ~ 현재 공주대학교 건설환경공학부 교수

<관심분야>

콘크리트재료, 콘크리트구조

**박 흥 태(Hong-Tae Park)**

[정회원]



- 1900년 2월 중앙대학교 대학원 (공학석사)
- 1995년 2월 중앙대학교 대학원 건설관리(공학박사)
- 1997년 10월 ~ 현재 공주대학교 건설환경공학부 부교수

<관심분야>

건설시공, 건설관리, 건설공정관리