

# TBM공법 적용 현장별 생산성 분석을 통한 효율성 개선 방안

## A Study on Efficiency Improvement through Productivity Analysis Based on TBM Operation Data

박홍태\* · 송용선\*\*

Park, Hong Tae · Song, Young Sun

### Abstract

This study presented the operation method through of productivity on eight analysis work items (TBM boring, cutter check and exchange, TBM maintenance, succeeding facilities, reinforcement in tunnel, operation alternation, a tram car) which have developed equipment at WRITH with TBM a waterway tunnel works. It was inquired lose time with analyzed result by work items and removed lose time. It was analyzed TBM boring length, TBM boring length percentage and TBM boring length time. This study analyzed TBM operation utility factor of a foreign work with TBM operation boring length percentage, a monthly average boring length, pure boring length percentage etc. and assumed a monthly average boring length and a monthly average boring length of rise forecast. Based on analyzed Data, TBM boring has been forecasted propriety pure boring length at compressive strength 675~1,662 kgf/cm<sup>2</sup>

**Keywords** : a waterway tunnel works, lose time, boring length, boring length of rise forecast.

### 요 지

본 연구는 독일의 WRITH사에서 개발된 장비로 수행한 TBM 수로터널 현장을 대상으로 TBM굴진(A), 커터 점검 및 교환(B), TBM 점검 및 급유(C), TBM 정비(D), 후속설비(E), 갱내보강(F), 운영교대(G), 광차(H)의 8개의 분석작업 항목별로 생산성 분석을 통한 효율성 개선 방안을 제시하였다. 제시된 결과를 가지고 각 항목별로 차지하는 손실시간을 추적하고, 이 손실시간을 제거하여 TBM 순굴진이 차지하는 시간과 백분율 그리고 월굴진장을 분석하였다. 또한, TBM운영 굴진율, 월평균굴진장(m), 순굴진율(%) 등을 외국현장의 TBM 운영 효율성의 비교 분석을 통한 상승예상 월평균 굴진장 추정과 독일의 WRITH사에서 표준치로 제시한 월평균 굴진장을 비교 분석하고, 5개의 수로터널현장 평균 암질의 압축강도 675~1662kgf/cm<sup>2</sup>에서의 적정 TBM 순굴진장을 예측하였다.

**핵심용어** : 수로터널현장, 시간손실, 굴진장, 상승굴진장

## 1. 연구의 목적

현재 국내에서 적용되는 터널굴착공법은 지형, 암질 등의 지질조건 등에 따라 다양한 공법들이 활용되고 있으나 1990년도 이후 각종 민원, 노무비 상승, 공기단축, 국토부의 표준품셈 제정 등으로 암반터널에서 TBM공법이 증가되고 있는 추세에 있다. 또한, 국제터널협회(ITA)의 통계자료에 의하면 미국, 오스트리아, 독일 등지에서 시공된 터널 중 30% 정도가 기계식 굴착방법인 TBM에 의해 시공, 전세계적으로 산업재해예방 및 자연보호 측면을 고려하여 TBM공법이 적극 활용되고 있는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 국내 OOO건설사가 독일 WRITH사에서 개발된 TBM(구경 3.5m)을 적용 운영한 국내 5개 수로터널 현장 대상으로 주요 8가지 분석작업항목의 TBM굴진 효율성

을 분석하고, 그 분석 결과를 일본과 미국에서 수행된 수로터널현장의 운영 결과와 비교 분석한 후, 상승예상 월평균 굴진장을 예측하였다. 또한, 예측된 결과를 독일의 WRITH사에서 제시한 TBM 월평균 굴진장과 비교 분석하고 그 신뢰성을 확인하여 TBM(구경 3.5m)장비의 운영 효율성 개선 방안을 제시하는데 그 목적이 있다.

## 2. 기존연구의 동향 및 연구방법

### 2.1 기존연구동향

본 연구와 연동된 기존 연구의 동향을 살펴보면, 국내의 경우 터널공법에서 TBM공법의 효율성을 분석한 터널굴착에서의 TBM공법의 적용사례 연구(이용일, 1997)와 암반에서의 TBM공법 적용사례를 제시한 HEAD ROCK에서의 TBM공

\*정회원 · 공주대학교 건설환경공학부 교수 (E-mail : htpark@kongju.ac.kr)  
\*\*교신저자 · 공주대학교 건설환경공학부 교수 (E-mail : ssong@kongju.ac.kr)

법 적용사례(박용운, 1996) 그리고 독일의 WRITH사에서 제시한 TBM장비별 굴진장을 제시한 Tunnel Boring Machine Method(유원건설, 1993) 등의 시도가 있었다. 외국의 경우 산악터널공사 시공사례를 소개한 일본의 토목공학사편 산악터널공사 실례집(토목공학사편, 1998)과 TBM공법에 의한 압쇄터널 굴착에 관한 암반기계유점의 기술해 놓은 Rock Mechanical Viewpoint on Excavation of Pressure Tunnel by TBM(T.nishida, Y.matsumura, 1993) 등의 있었다.

### 2.2 연구방법

본 논문에서는 이용일 등(1997)과 박용운 등(1996)의 접근 방식을 개선하여 TBM굴진(A), 커터점검 및 교환(B), TBM 점검 및 급유(C), TBM정비(D), 후속설비(E), 갱내보강(F), 운영교대(G), 광차(H)의 8개의 분석작업항목별로 TBM 굴진율의 생산성을 분석하였다.

표 1. OOO건설사에서 수행한 TBM 수로터널현장 현황

현장구분		구경 및 연장	지질조건
A 현장	OOO 방류관거 공사 현장	TBM(Ø3.5m), (L) 3,835m	안산암 (800~1600kgf/cm <sup>2</sup> )
B 현장	OOO 광역상수도공사현장	TBM(Ø3.5m), (L) 4,361m	응회암 (600~1000kgf/cm <sup>2</sup> ) 안산암 (800~1600kgf/cm <sup>2</sup> )
C1 현장	OO 공업용 수공사 현장	TBM(Ø3.5m), (L) 8,054m	화강암 (600~2000kgf/cm <sup>2</sup> ), 화강섬록암 (800~1800kgf/cm <sup>2</sup> )
C2 현장		TBM(Ø3.5m), (L) 7,593.5m	화강암 (600~2000kgf/cm <sup>2</sup> ), 화강섬록암 (800~1800kgf/cm <sup>2</sup> )
C3 현장		TBM(Ø3.5m), (L) 2,472.5m	안산암 (400~1500kgf/cm <sup>2</sup> )

TBM굴진을 생산성 분석은 OOO건설사에서 독일의 WRITH사에서 개발된 장비(TBM 구경 3.5m)로 수행한 TBM 수로터널 현장 Operator가 작업 전과정을 수록한 굴진 보고서(Drilling Report)를 통계화하여 이것의 분석을 통해 각 항목별로 차지하는 손실시간(Lose Time)을 추적하고, 이 손실 시간을 제거하여 TBM 순굴진이 차지하는 시간과 백분율 그리고 월굴진장을 분석하였다. 또한, TBM운영 굴진을 분석, 월평균굴진장(m), 순굴진율(%) 등을 외국(일본 및 미국)현장

표 2. TBM 운영 현장 굴진을 분석(1일 24시간, 월 25일 기준)

분석작업항목	시간단위 : (분)					총소요기간(분)	백분율
	A공사현장	B공사현장	C1공사현장	C2공사현장	C3공사현장		
TBM굴진	153.715	159.350	301.520	301.320	87.055	1,002.960	33.6%
커터점검 및 교환	48.890	36.405	114.430	118.440	28.955	347.120	11.6%
TBM점검 및 급유	14.760	8.435	16.690	16.400	8.210	64.495	2.2%
TBM정비	26.205	38.365	150.200	143.205	35.300	393.275	13.2%
후속설비	30.730	41.045	44.635	65.395	13.255	195.060	6.5%
갱내보강	54.605	73.530	123.020	118.855	29.045	399.055	13.4%
운영교대	45.080	67.505	120.715	111.405	25.615	370.320	12.4%
광차	24.215	33.735	62.920	69.100	24.385	214.355	7.2%
합계	398.200	458.370	934.130	944.120	251.820	2,986.640	100.0%

의 TBM 운영 효율성의 비교 분석을 통한 상승예상 월평균 굴진장 추정과 독일의 WRITH사에서 표준치로 제시한 월평균 굴진장을 비교 분석하고, 특정 암질의 일축압축강도(5개 현장 평균 암질의 압축강도 675~1662kgf/cm<sup>2</sup>)에서의 적정 TBM 순굴진장을 예측하였다. 표 1은 본 연구의 대상인 국내 OOO건설사에서 독일의 WRITH사에서 개발된 장비(TBM 구경 3.5m)로 수행한 TBM 수로터널 현장 현황을 나타내고 있으며, 그림 1은 본 연구의 목적을 달성하기 위한 연구의 절차를 나타내고 있다.

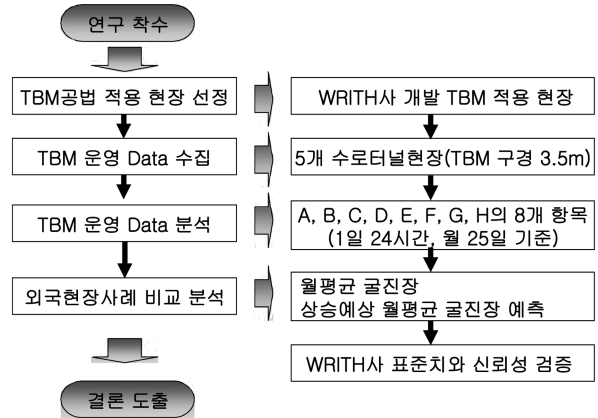


그림 1. 연구의 흐름도

### 3. TBM 터널공사 현장별 효율성 분석

TBM 터널 5개 공사 현장 조건은 TBM 구경 3.5m이며, 암질 또한 안산암, 변성암, 화강암, 편마암 등 다양하게 분포되어 있었다. 이들 5개 현장의 현장별 효율성 분석(1일24시간, 월 25일 기준) 결과는 다음과 같다.

표 2는 본 연구에서 선택한 TBM구경 3.5m 5개 수로터널 현장을 대상으로 TBM 굴진, 커터 점검 및 교환, TBM 점검 및 급유, TBM 정비, 후속설비, 갱내보강, 운영교대, 광차의 8개 분석작업항목별 총소요시간(분)과 평균 백분율(%)을 분석한 자료이다. 이 분석자료는 5개 수로터널 현장의 분석작업항목별 평균백분율을 기준으로 하여 A공사현장, B공사현장, C1공사현장, C2공사현장, C3공사현장의 분석작업항목별 백분율과 TBM 운영 효율성을 비교 및 분석하는 기준으로 활용 하였다. 여기서, C현장은 1공구, 2공구, 3공구로 분할하여 TBM굴진 작업이 수행되었으며, 분석의 편리를 위해 1공구를 C1공사현장, 2공구를 C2공사현장, 3공구를

C3공사현장으로 명명하여 분석하였다.

### 3.1 A 공사현장 분석

표 3의 A 공사현장은 TBM 구경 3.5m, 굴진 길이(L) 3,835m, 암질은 안산암(800~1600kgf/cm<sup>2</sup>), 변성암으로 구성되어 있으며, 압축강도 및 암질양호로 굴진효율이 좋은 편이었다. 표 3은 본 현장의 TBM 굴진작업분석 결과를 나타내고 있다.

표 3. A 공사현장의 굴진작업분석

굴진작업 항목	A공사현장	
	소요작업시간(분)	백분율 (%)
A TBM굴진	153,715	38.6
B 커터점검 및 교환	48,890	12.3
C TBM점검 및 급유	14,760	3.7
D TBM정비	26,205	6.6
E 후속설비	30,730	7.7
F 갱내보강	54,605	13.7
G 운영교대	45,080	11.3
H 광차	24,215	6.1
합계	398,200	100.0

A 공사현장의 경우 분석작업항목 A의 TBM 굴진율이 38.6%, 전체현장 A의 TBM 평균굴진율 33.6%로 A공사현장이 5.0% 높게 나타났으며, 이 결과는 D, G, H의 작업분석항목에서 전체현장보다 시간손실율이 낮은 것이 주된 요인으로 나타났다.

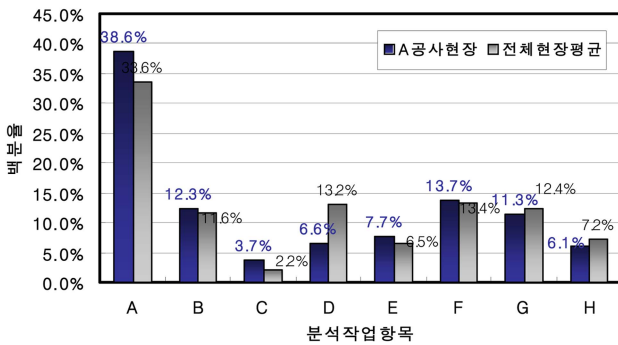


그림 2. A공사현장 백분율과 전체현장 평균백분율 비교

### 3.2 B 공사현장 분석

표 4의 B 공사현장은 TBM 구경 3.5m, 굴진 길이(L) 4,361 m, 암질은 응회암(600~1000kgf/cm<sup>2</sup>), 안산암(800~1600kgf/cm<sup>2</sup>)으로 구성되어 있으며, 압축강도 및 암질양호로 굴진효율이 좋은 편이었다. 표 3은 본 현장의 TBM 굴진작업분석 결과를 나타내고 있다.

B공사현장의 경우 분석작업항목 A의 TBM 굴진율이 34.8%, 전체현장 A의 TBM 평균굴진율 33.6%로 B공사현장이 1.2% 높게 나타났으며, 이 결과는 B, C, D의 분석항목에서 전체현장보다 시간손실율이 낮은 것이 주된 요인으로 나타났다.

표 4. B 공사현장의 굴진작업분석

굴진작업 항목	B공사현장	
	소요작업시간(분)	백분율 (%)
A TBM굴진	159,350	34.8
B 커터점검 및 교환	36,405	7.9
C TBM점검 및 급유	8,435	1.8
D TBM정비	38,365	8.4
E 후속설비	41,045	9.0
F 갱내보강	73,530	16.0
G 운영교대	67,505	14.7
H 광차	33,735	7.4
합계	458,370	100.0

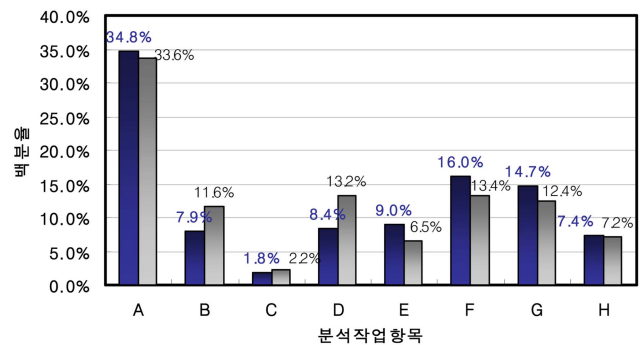


그림 3. B공사현장 백분율과 전체현장 평균백분율 비교

### 3.3 C 공사현장 분석

C공사현장은 1공구, 2공구, 3공구로 분할하여 TBM 굴착 작업에 수행되었으며, 분석의 편리를 위해 1공구를 C1공사현장, 2공구를 C2공사현장, 3공구를 C3공사현장으로 명명하여 분석하였다.

표 5, 표 6, 표 7의 OO 공업용수공사 현장은 TBM 구경 3.5m, 굴진 길이(L) 8,054.0m, 암질은 안산암(400~1500kgf/cm<sup>2</sup>), 화강암(600~2000kgf/cm<sup>2</sup>), 화강섬록암(800~1800kgf/cm<sup>2</sup>)으로 구성되어 있으며, 압축강도 및 암질양호로 굴진효율이 좋은 편이었다. 표 5, 표 6, 표 7의 본 현장의 TBM 굴진작업 분석 결과를 나타내고 있다.

표 5. C1 공사현장의 굴진작업분석

굴진작업 항목	C1공사현장	
	소요작업시간(분)	백분율 (%)
A TBM굴진	301,520	32.3
B 커터점검 및 교환	114,430	12.2
C TBM점검 및 급유	16,690	1.8
D TBM정비	150,200	16.1
E 후속설비	44,635	4.8
F 갱내보강	123,020	13.2
G 운영교대	120,715	12.9
H 광차	62,920	6.7
합계	934,130	100.0

C1공사현장의 경우 분석작업항목 A의 TBM 굴진율이 32.3%, 전체현장 A의 TBM 평균굴진율 33.6%로 C1공사현

장이 1.3% 낮게 나타났으며, 이 결과는 B, D, G의 분석항목에서 전체현장보다 시간손실율이 높게 된 것이 주된 요인으로 나타났다.

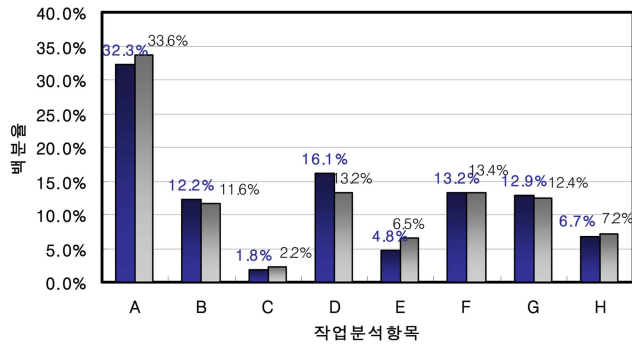


그림 4. C1공사현장 백분율과 전체현장 평균백분율 비교

표 6. C2 공사현장의 굴진작업분석

굴진작업 항목	C2공사현장		
	소요작업 시간(분)	백분율 (%)	
A	TBM굴진	301,320	31.9
B	커터점검 및 교환	118,440	12.5
C	TBM점검 및 급유	16,400	1.7
D	TBM정비	143,205	15.2
E	후속설비	65,395	6.9
F	갱내보강	118,855	12.6
G	운영교대	111,405	11.8
H	광차	69,100	7.3
합계		944,120	100.0

C2공사현장의 경우 분석작업항목 A의 TBM 굴진율이 31.9%, 전체현장 A의 TBM 평균굴진율 33.6%로 C2공사현장이 1.7% 낮게 나타났으며, 이 결과는 B, D, E의 분석항목에서 전체현장보다 시간손실율이 높게 된 것이 주된 요인으로 나타났다.

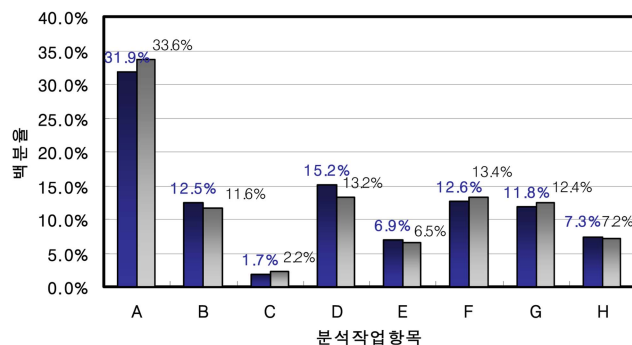


그림 5. C2공사현장 백분율과 전체현장 평균백분율 비교

C3공사현장의 경우 분석작업항목 A의 TBM 굴진율이 34.6%, 전체현장 A의 TBM 평균굴진율 33.6%로 C3공사현장이 1.0% 높게 나타났으며, 이 결과는 B, E, F, G의 분석항목에서 전체현장보다 시간손실율이 낮게 된 것이 주된 요인으로 나타났다.

표 7. C3 공사현장의 굴진작업분석

굴진작업 항목	C3공사현장		
	소요작업시간(분)	백분율 (%)	
A	TBM굴진	87,055	34.6
B	커터점검 및 교환	28,955	11.5
C	TBM점검 및 급유	8,210	3.3
D	TBM정비	35,300	14.0
E	후속설비	13,255	5.3
F	갱내보강	29,045	11.5
G	운영교대	25,615	10.2
H	광차	24,385	9.7
합계		251,820	100.0

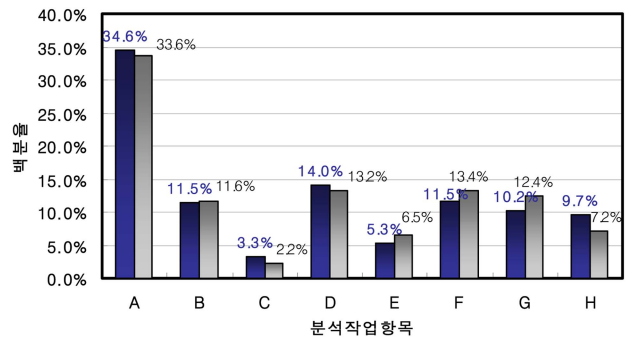


그림 6. C3공사현장 백분율과 전체현장 평균백분율 비교

이 절에서 분석된 분석항목별 소요작업시간과 백분율을 가지고 다음 절의 TBM 운영 현장의 효율성 개선 방안을 제시한다.

#### 4. TBM 운영 수로터널 현장의 효율성 개선 방안

##### 4.1 분석현장의 순굴진장 분석

현장별 TBM(구경 3.5m) 월평균 순굴진장을 분석해본 결과 표 8에서와 같이, 전체현장평균, 316.1m(33.6%), A현장 345.5m(38.6%), B현장 343.4m(34.8%), C1현장 311.0m(32.3%), C2현장 289.8m(31.9%), C3현장 353.2m(34.6%)로 분석되었다. 그림 7은 표 8을 도식화하여 표현한 것이다.

표 8. TBM 월평균 순굴진장 분석(1일 24시간, 월 25일 기준)

현장구분	총굴진장 (m)	분	월	월평균 굴진장(m)	순굴진율 (%)
전체현장 평균	26,316.0	2,986,640	83.0	317.1	33.6
A 현장	3,835.0	398,200	11.1	345.5	38.6
B 현장	4,361.0	458,370	12.7	343.4	34.8
C1현장	8,054.0	934,130	25.9	311.0	32.3
C2현장	7,593.5	944,120	26.2	289.8	31.9
C3현장	2,472.5	251,826	7.0	353.2	34.6

표 8에서 C3 현장 순굴진율 34.6%로 A 현장의 순굴진율 38.6%, B현장의 순굴진율 34.8%보다 낮았음에도 불구하고 월평균 굴진장이 A 현장과 B현장보다 C3현장이 크게 나타난 것은 현장조건의 암질에 따라 달라짐을 알 수 있었다.

C3현장은 안산암으로 구성되어 있고 압축강도는 400~1,500 kgf/cm<sup>2</sup>으로 다른 현장에 비해 비교적 낮은 압축강도를 보이고 있었다.

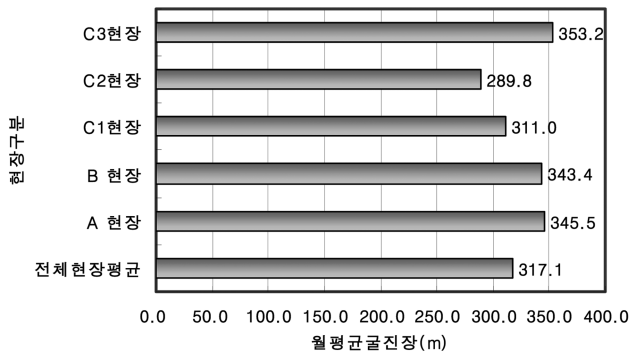


그림 7. TBM 현장별 월평균 굴진장 분석

#### 4.2 외국 현장과 효율성 운영 비교 분석

본 절에서는 앞 절에서 분석한 굴진분석 작업항목을 미국 (Atlata 수로터널)현장과 일본(규야마 배수지공사)현장에서 TBM 구경 5.0m로 굴진 운영하여 효율성을 분석해 놓은 결과와 비교해 보았다. 표 9는 미국(Atlata 수로터널) 현장과 일본(규야마 배수지공사) 현장의 TBM 굴진을 비교 분석 자료로 여러 해외 현장 굴진 데이터 중에서 평균치에 가장 가까운 두 개 현장의 실례이며(박용운,1996), A(순굴진), B(커터점검 및 교환), D(TBM 정비), F(갱내보강), C,E,G,H (TBM 점검 및 급유, 후속설비, 운영교대, 광차)의 굴진분석 작업항목에 대하여 이들 2개 현장에서 분석한 결과와 평균치를 나타낸 것이다.

표 9. 외국 현장의 굴진 비교 분석(박용운,1996)

국가	굴진 현장	분석항목(%)				
		A	B	D	F	C, E, G, H
미국	Atlata 수로터널현장	40.4	15.0	15.7	11.9	25.3
일본	규야마 배수지공사현장	37.5	9.9	18.6	6.5	27.5
평균		39.0	17.8	16.2	6.6	20.6

TBM 운영 전체 굴진율에서 살펴보면 A(순굴진) 분석작업 항목과 나머지 B(커터점검 및 교환), D(TBM 정비), C, E, G, H(TBM 점검 및 급유, 후속설비, 운영교대, 광차) 분석작업항목과는 반비례의 관계를 나타내고 있다. 즉, A 분석항목이 차지하는 순굴진 백분율이 높을수록 나머지 분석항목의 시간 손실 백분율은 낮아지며, 반대로 A 분석항목이 차지하는 순굴진 백분율이 낮을수록 나머지 분석항목의 시간 손실 백분율은 높아지게 된다.

분석결과 표 10, 표 11, 표 12에서와 같이 분석현장이 B D 항목에서 시간손실율이 낮았고, F와 C, E, G, H항목에서 시간 손실율이 높은 것을 알 수 있다. 이들 항목의 경우 TBM장비에서의 문제점이 아니라 관리적인 측면에서의 시간 손실율이 높은 것으로 이들 분석작업항목들만 잘관리할 경우 시간손실율을 낮추어 월굴진율을 높일 수 있을 것으로 분석되었다.

표 10. 외국(Ø3.5m) 현장과 국내 분석 전체(5) 현장 굴진 비교 분석

구분	분석항목(%)				
	A	B	D	F	C, E, G, H
(미국/일본) 현장 평균	39.0	17.8	16.2	6.6	20.6
분석현장 전체평균	33.6	11.6	13.2	13.4	28.2
편차	(-)5.3	(-)6.2	(-)3	(+)6.8	(+)7.6

표 10에서 분석결과를 살펴보면, 분석현장 전체평균의 A 항목은 외국 현장에 비해 (-)5.3% 낮은 것으로 나타났으며, B와 D의 경우는 (-)6.2%, (-)3.0%의 시간 손실율이 낮은 것으로 나타나 효율적인 운영을 한 것으로 나타났다. 그러나 F와 C,E,G,H항목에서 각각 (+) 6.8%, (+) 7.6%의 시간 손실율이 높은 것으로 나타나 상대적으로 A항목의 효율성이 외국 현장에 비해 낮은 주된 원인이 되었다. 따라서 분석현장의 전체평균의 월굴진장 효율성을 높이기 위해서는 F와 C,E,G,H항목에서 시간손실율을 최소화 시킴으로서 순굴진율을 높여 월굴진장을 증대 시켜 공기단축의 효과를 기대할 수 있을 것으로 분석되었다.

TBM 순굴진율은 암질, 현장조건, 터널구경, 기술력, 공사 관리능력 등에 따라 다르게 나타날 수 있지만, 분석현장의 경우, 외국현장의 평균치에 비해 F 및 C, E, G, H항목에서 소요되는 시간손실율에 크게 좌우됨을 알 수 있었다. 따라서 이들 분석작업항목에 대한 시간손실을 외국현장 F와 C, E, G, H항목의 평균치에 일치하도록 시간손실율을 감하고 감소된 시간 손실율을 A항목에 가산함으로써 굴진율을 높일 수 있다. 따라서 TBM 굴진을 상승 기능분은 다음과 같이 산정

표 11. 외국현장과 비교분석을 통한 전체현장 평균 굴진상승 예상율 및 상승예상 월평균 굴진장

현장구분	편차		분석현장			
	F	C, E, G, H	월평균굴진장 (m)	월평균굴진율 (%)	상승예상율 (%)	상승예상 월평균 굴진장(m)
전체현장	(+)6.8	(+)7.6	317.1	33.6	5.0 (15.9m)	333.0

표 12. 외국 현장과 국내 (Ø3.5m) 현장 굴진 비교 분석

구분		분석항목(%)				
		A	B	D	F	C, E, G, H
(미국/일본)현장 평균		39.0	17.8	16.2	6.6	20.6
A공사 현장	평균	38.6	12.3	6.6	13.7	28.8
	편차	(-)0.4	(-)5.5	(-)9.6	(+)7.1	(+)8.2
B공사 현장	평균	34.8	7.9	8.4	16.0	32.9
	편차	(-)4.2	(-)9.0	(-)7.8	(+)9.4	(+)12.3
C1공사 현장	평균	32.3	12.2	16.1	13.2	26.2
	편차	(-)6.7	(-)5.6	(-)0.1	(+)6.6	(+)5.6
C2공사 현장	평균	31.9	12.5	15.2	12.6	27.7
	편차	(-)7.1	(-)5.3	(-)1.0	(+)6.0	(+)7.1
C3공사 현장	평균	34.6	11.5	14.0	11.5	28.5
	편차	(-)4.4	(-)6.3	(-)2.2	(+)4.9	(+)7.9

해 볼 수 있었다. TBM 굴진상승율 = 14.4% × 0.336 = 4.8%, 상승예상분 월평균 굴진장 = 317.1m × 0.048 = 15.3m, 상승예상분 반영 월평균 굴진장 = 317.1m + 15.3m = 333m 된다. 이와 같이 14.4%의 시간손실을 제거하여, TBM 굴진시간을 늘린다면, 실질적인 순굴진율 향상을 약 4.8% 정도 상승하는 것으로 나타났다. 즉, 4.8%를 고려하면 317.1m에서 333m로 증가하게 됨을 알 수 있다. 결국 TBM 굴진율은 암질이나 현장조건뿐 아니라 공사관리 측면을 고려한 기술력을 향상 시킨다면 순굴진율을 높일 수 있고 나아가 월순굴진장을 증대시킬 수 있음을 알 수 있었다.

표 12의 A, B, C1, C2 및 C3 공사현장에 대해서도 동일한 분석방법으로 분석한 결과는 표 13과 같다.

표 13은 현장별 굴진 상승예상율 및 상승예상 월평균 굴진장을 분석한 것으로 A현장은 상승예상율 5.9%, 상승예상 월평균 굴진장 365.9m, B현장은 상승예상율 7.6%, 상승예상 월평균 굴진장 369.5m, C1현장은 상승예상율 3.9%, 상승예상 월평균 굴진장 323.2m, C2현장은 상승예상율 4.2%, 상승예상 월평균 굴진장 302.0m, C3현장은 상승예상율 4.4%, 상승예상 월평균 굴진장 368.7m로 분석되었다.

표 13. 외국현장과 비교분석을 통한 현장별 굴진상승예상율 및 상승예상 월평균 굴진장

현장 구분	편차		분석 현장			
	F	C, E, G, H	월평균굴진장 (m)	월평균굴진율 (%)	상승예상율 (%)	상승예상 월평균 굴진장(m)
A현장	(+)7.1	(+)8.2	345.5	38.6	5.9 (20.4m)	365.9
B현장	(+)9.4	(+)12.3	343.4	34.8	7.6 (26.1m)	369.5
C1현장	(+)6.6	(+)5.6	311.0	32.3	3.9 (12.2m)	323.2
C2현장	(+)6.0	(+)7.1	289.8	31.9	4.2 (12.2m)	302.0
C3현장	(+)4.9	(+)7.9	353.2	34.6	4.4 (15.5m)	368.7

이 상승예상 월평균 굴진장(m)을 가지고 공기단축일 수를 산정해보면 표 14와 같이 나타났다. 표 14는 상승분 반영 현장별 공기단축일수를 분석한 결과로 전체현장평균은 1.3일, A현장은 1.5일, B현장은 1.9일, C1현장 1.0일, C2현장은 1.1일, C3현장은 1.1일로 분석되었다. 이 분석일수만큼 공사비를 절감할 수 있게 된다.

표 14. 상승분 반영 현장별 공기단축일수

현장 구분	실적자료분석		상승분 반영분석	
	월굴진속도 (m/월)	소요일수	상승예상 월평균 굴진장(m/월)	공기단축 가능일수
전체현장평균	317.1	2074	333.0	1.3
A현장	345.5	276.5	365.9	1.5
B현장	343.4	318.3	369.5	1.9
C1현장	311.0	648.7	323.2	1.0
C2현장	289.8	655.6	302.0	1.1
C3현장	353.3	174.8	368.7	1.1

표 15는 월평균 굴진장의 국내 분석현장(월평균 굴진장 및

상승분 고려한 월평균 굴진장)과 WRITH사의 표준치(1일 18시간, 월 25일 기준)를 비교 분석한 결과로, 월평균 굴진장은 WRITH사의 표준치 330m 보다는 다소 적은 굴진장을 보이고 있지만, 상승분 고려한 월평균 굴진장은 330m로 WRITH사의 표준치와 같거나 약간 크게 나타났다.

표 15. 표준치(독일 WRITH사)와 기종별 월평균 굴진장 비교 분석

현장	월평균 굴진장	상승분 반영	
		예상율	월평균굴진장
WRITH사 표준치	330.0m	-	330.0m
A현장	345.5	5.9(20.4m)	365.9
B현장	343.4	7.6(26.1m)	369.5
C1현장	311.0	3.9(12.2m)	323.2
C2현장	289.8	4.2(12.2m)	302.0
C3현장	353.3	4.4(15.5m)	368.7

표 16은 표준치(독일 WRITH사)와 전체현장 평균 월평균 굴진장 비교 분석한 결과로, TBM 구경 3.5m장비, 5개 현장 평균 암질의 압축강도 675~1662kgf/cm<sup>2</sup> 경우, 월평균 굴진장 317.0~333.0m를 표준치로 결정할 수 있는 것으로 분석되었다.

표 16. 표준치(독일 WRITH사)와 전체현장 평균 월평균 굴진장 비교 분석

현장	TBM 기종	암종	월평균 굴진장	상승분 반영	
				예상율	월평균 굴진장
WRITH사 표준치	(독일 WRITH사) (Ø3.5m)	경암(40%) 보통암(40%) 연암(10%) 풍화암(10%)	330.0m	-	330.0m
전체현장 평균	(독일 WRITH사) (Ø3.5m)	평균 암질의 압축강도 675~1662kgf/cm <sup>2</sup>	317.1m	5.0 (15.9m)	333.0m

## 5. 결 론

독일의 WRITH사에서 개발한 TBM 구경 3.5m 장비를 운영하여 5개 수로터널 현장을 대상으로 TBM 운영생산성을 분석 하여 다음과 같은 결론을 예측할 수 있었다.

1. 분석 대상 5개 현장의 암질 및 TBM 운영 굴진분석항목의 평균치로 일축압축강도 675~1662kgf/cm<sup>2</sup>에서 TBM 순굴진 33.6%, 커터 점검 및 교환 11.6%, TBM 정비 13.3%, 갱내보장 13.4%, TBM 점검 및 급유, 후속설비, 운영교대, 광차 28.2%로 분석되었으며, 이 결과는 일축압축강도 675~1662kgf/cm<sup>2</sup>에서 TBM 구경 3.5m 장비의 굴진 기준 예측치로 활용할 수 있을 것이다.
2. TBM 굴진현장 암질의 일축압축강도 675~1662kgf/cm<sup>2</sup>에서 독일의 WRITH사에서 개발한 TBM 구경 3.5m 장비를 운영할 경우, F 및 C, E, G, H 공종의 상승 예상율 5.0%를 반영한 TBM 순굴진율은 38.6%를 기준 목표치로 설정할 수 있는 것으로 나타났으며, 월평균 굴진장은 317.0m~333.0m를 표준치로 활용할 수 있을 것이다. 이

수치는 독일의 WRITH사(TBM 구경 3.5m 장비)에서 제시한 월평균 굴진장 330.0m와 대동소이한 수준으로 나타났다.

본 연구에서 제시한 결과치는 향후 독일의 WRITH사에서 개발한 TBM 구경 3.5m 장비를 적용하여 운영할 경우, 8개 분석작업항목별 생산의 효율성을 판단하는데 유용하게 활용될 것으로 사료된다.

### 참고문헌

도회종합설계공사(2000) 울산공업용수 Project 설계보고서.  
박용운 외 1인(1998) HARD ROCK에서의 TBM공법 적용사례,

지하공간 건설에 대한 심포지움 논문집, 한국지반공학회.  
울트라건설(주)(2000) 터널굴착기술의 혁신, TBM 공법, pp. 1-20.

유원건설(주)(1993), *Tunnel Boring Machine Method*.  
이용일 외 3인(1997), 터널굴착에서의 TBM 공법 적용사례, 한국터널학회지, 한국터널학회.

일본의 산악터널공사 사례집(1998) 토목공학사편.  
David Marin (1988) Proven TBM's Turn Power up in Norway Tunneling.

Nishida, T. and Matsumura, Y. (1993) Rock Mechanical Viewpoint on Excavation of Pressure Tunnel by TBM.

ULTRA, Tunnel Boring Machine Method, 울트라건설(주).

(접수일: 2009.12.9/심사일: 2009.12.24/심사완료일: 2009.12.24)