

TBM 굴착 공법 적용 현장의 생산성 분석을 통한 암질별 굴진속도 및 직접공사비 분석

Analysis of Excavation Speed and Direct Construction Cost Based on the Operating Productivities of TBM Method Site

송용선* · 박홍태**

Song, Young Sun · Park, Hong Tae

Abstract

This research collected work drilling report of TBM method site developed by WRITH company to TBM equipment company in Germany and analyzed work operating productivity. Based on the data analyzed TBM operating productivity, This research derived and presented excavation speed (m/day) by TBM diameter (3.0m, 3.5m, 3.8m) and rock. Also, based on the excavation speed (m/day) by TBM diameter, This research estimated a day direct construction cost and total direct construction costs by applying a direct construction cost which spent on per 1m. When we perform a similar geological construction in the future, excavation speed and direct construction cost which were derived by TBM diameter and rock is thinking the effective utilization data to estimate construction cost and plan schedule management before the start of construction.

Keywords : work operating productivity, excavation speed (m/day), direct construction cost, schedule management

요 지

본 연구는 대표적인 TMB 장비 회사인 독일 WRITH사에서 개발한 TMB 공법 적용 현장의 굴진보고서를 수집하여 작업운영 생산성을 분석하였다. 그리고 분석된 자료를 근거로 구경별(3.0m, 3.5m, 3.8m) 굴진속도(m/일)를 도출하였다. 또한, 도출된 구경별 굴진속도를 근거로 독일의 WRITH사에서 구경별로 제시한 1m당 굴진에 소요되는 직접공사비를 적용하여 총 직접공사비를 산출하였다. 암질별 구경별로 도출된 굴진속도는 향후 유사한 암질에서 공사를 수행할 때, 공사 착수 전 총작업일수 및 총직접공사비의 산정을 활용한 공정 계획 및 관리를 수행하는데 효과적인 활용 자료가 될 것으로 사료된다.

핵심용어 : 작업운영생산성, 굴진속도(m/일), 직접공사비, 공정 계획 및 관리

1. 연구의 목적

현재 국내에서 적용되는 터널굴착공법은 지형, 암질 등의 지질조건 등에 따라 다양한 공법들이 활용되고 있으나, 1990년 이후 각종 민원, 노무비 상승, 공기단축, 국토해양부의 표준품셈 제정 등으로 터널공사에서 대구경 굴착공법인 TBM공법이 증가되고 있는 추세에 있다. 국제터널협회(ITA, International Tunnelling Association)의 통계자료에 의하면 미국, 오스트리아, 독일에서 시공된 터널 중 30% 정도가 TBM공법에 의해 시공되고 있으며, 전 세계적으로 산업재해 예방 및 자연보호 측면을 고려하여 굴진, 버력반출, 지보작업을 연속으로 수행하는 TBM공법이 적극적으로 활용되고 있는 것으로 나타났다.

본 연구는 국내 000건설사가 독일 WRITH사에서 개발된 “TBM(구경 3.0m, 3.5m, 3.8m) 공법”을 적용하여 운영한

국내 6개 수로터널 현장을 대상으로 주요 9가지의 작업공종별로 TBM 굴진 생산성을 분석하고, 이를 근거로 굴진속도(m/일)를 도출하여 총 작업일수 및 총직접공사비를 분석하는데 목적이 있다.

암질별, 구경별로 분석하여 제시한 굴진속도의 결과치는 향후 동일조건인 수로터널공사를 수행할 때, 공사 착수 전 TBM 운영의 총작업일수 및 총직접공사비를 추정하고 이를 근거로 공정계획을 수립하는데 유용한 자료가 될 것이다.

2. 기존 연구 동향 및 연구 방법

2.1 연구의 동향

본 연구와 연동된 기존 연구의 동향을 살펴보면, 국내터널공사에서 TBM공법의 효율성을 분석한 TBM공법의 적용 사례 연구(이용일, 1997)와 암반에서의 TBM공법 적용 사례를

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

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

제시한 HEAD ROCK에서의 TBM공법 적용 사례 연구(박운용 1996), 독일의 WRITH사에서 제시한 TBM 장비별 굴진장을 제시한 Tunnel Boring Machine Method(유원건설, 1993) 그리고 TBM공법을 적용한 현장별 생산성 분석을 통한 효율성 개선방안 연구 등의 시도가 있었다. 외국의 경우 산악터널공사의 시공사례가 소개한 일본의 토목공학사편 산악터널공사의 실례집(토목공학사편, 1998)과 TBM 공법에 의한 압쇄터널 굴착에 관한 유의점을 기술해 놓은 Rock Mechanical Viewpoint on Excavation of Pressure Tunnel by TBM(Nishida and Matsumura, 1993) 등이 있으나, 본 연구와 같이 TBM공법 작업항목별 생산성 분석을 통한 굴진속도를 도출하여 총작업일수와 총직접공사비를 산출한 연구는 전무한 실정이다.

2.2 연구의 방법

본 논문에서는 현장 관리자(Operator)가 작업 전 과정을 수록한 작업굴진 보고서(Work Drilling Report)를 통계에 의한 및 분석을 통해 각 분석 작업항목별로 차지하는 손실시간(Lose Time)을 추적하고, 이 손실시간을 제거하여 TBM 장비의 순 굴진시간을 분석한 이용일과 박용운의 접근 방법을 활용하여 **A: 순 굴진시간, B: Cutter 점검/교환, C: TBM 정비, D: TBM 점검/급유, E: 후속설비, F: 광차, G: 운영교대, H: 갱내보강/낙반보강, I: 안전/회의의 9개 분석 작업 항목별로 TBM 장비(구경 3.0m, 3.5m, 3.8m) 굴진율의 생산성을 분석하여 굴진속도를 도출 하였다. 또한, 도출된 구경별 굴진속도를 근거로 총작업일수와 독일의 WRITH사에서 구경 별로 제시한 1m당 굴진에 소요되는 직접공사비를 적용하여 구경별 총 직접공사비를 추정하였다.**

그러나 본 연구에서 분석한 TBM공법의 수행 현장이 한정되어 있고 동일한 구경과 동일한 암질분포 조건의 굴진보고서를 수집하는데 한계가 있었기 때문에 본 연구가 발전적으로 수행되기 위해서는 동일한 조건의 자료를 지속적으로 확보하면서 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

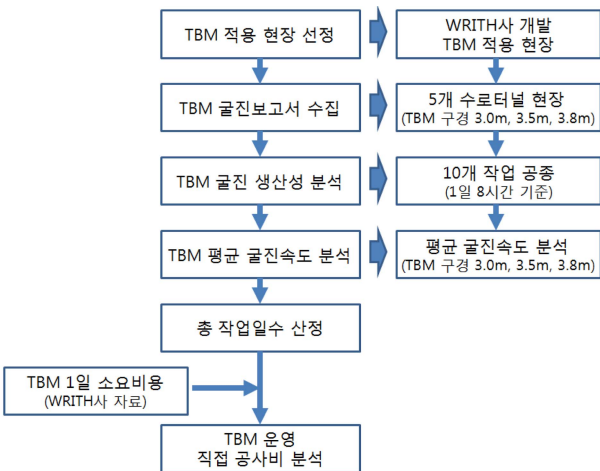


그림 1. 연구의 흐름도

그림 1은 본 연구의 목적을 달성하기 위한 연구의 흐름도를 나타내고 있으며, 표 1은 본 연구의 대상인 국내 000건설사에서 수행한 TBM 수로터널 현장 현황을 나타내고 있다.

표 1. 000건설사에서 수행한 연구 대상 TBM 수로터널 현장 현황

현장구분	구경 및 연장	암질 분포 압축강도(kgf/cm ²)
A현장	000 차집 관거 증설 터널 공사 TBM(구경 3.0m) L=399m	편마암 (200~700)
B현장	000 송수터널 공사 TBM(구경 3.0m) L=4,331m	화강암 (1,000~1,500)
C현장	000 광역 상수도 사업 터널 공사 TBM(구경 3.5m) L=4,361m	응회암 (600~1,000) 안산암 (800~1,600)
D현장	0000 방류 관거 터널 공사 TBM(구경 3.5m) L=3,835m	안산암 (800~1,600)
E현장	00000 도수 터널 공사 TBM(구경 3.5m) L=18,120m	안산암 (400~1,500) 화강암 (600~2,000) 화강섬록암 (800~1,800)
F현장	00 다목적댐 수로 터널 공사 TBM(구경 3.8m) L=21,108m	안산암 (800~1,500)

3. TBM 굴착공법의 작업 생산성 분석

TBM 터널 구경 3.0m A, B현장, 3.5m C, D, E 현장, 3.8m F현장의 6개 현장 암질분포 조건은 표 1과 같이 편마암, 화강암, 응회암, 안산암, 화강섬록암 등 다양한 암질분포를 가지고 있었다. 이들 6개 현장의 현장별 9개 작업분석항목으로 구분하여 작업 생산성을 분석한 결과는 표 2~표 7, 그림 2~그림 4와 같다.

3.1 A 공사현장 작업 생산성 분석

A 공사현장은 TBM 구경 3.0m, 굴진 길이(L) 899m, 암질은 편마암 200~700kgf/cm² 으로 구성되어 있으며, 전체 암질의 변질도 및 풍화도가 심하여 굴진하여 막장자립에 문제가 발생한 특징을 가지고 있었다. A 공사현장의 경우, 막장 자립에 문제가 있는 지반으로 갱내보강/낙반보강이 34.1%를 차지하였고, 순작업량을 나타내는 순굴진시간은 총

표 2. 굴진 작업 분석(구경 3.0m)

작업 공종	A 공사 현장		
	작업 소요시간(mim)	백분율(%)	
순굴진 시간	굴진	25,500	20.3
	Resetting	6,800	5.4
	소계	32,300	25.7
Cutter 점검/교환	10,811	8.6	
TBM 정비	9,800	7.8	
TBM 점검/급유	1,989	1.6	
후속설비	9,570	7.6	
광차	4,917	3.9	
운영교대	9,980	7.9	
갱내보강/낙반보강	42,904	34.1	
안전/회의	3,480	2.8	
총굴진시간	125,742	100	

표 3. 굴진작업분석(구경 3.0m)

작업 공종		B 공사 현장	
		작업 소요시간(mim)	백분율(%)
순굴진 시간	굴진	146,270	32.3
	Resetting	18,490	4.1
	소계	164,760	36.4
Cutter 점검/교환		33,275	7.3
TBM 정비		26490	5.8
TBM 점검/급유		28,360	6.3
후속설비		39,350	8.7
광차		45,205	10.0
운영교대		65,445	14.4
갱내보강/낙반보강		35,970	7.9
안전/회의		14,195	3.1
총굴진시간		453,050	100

표 4. 굴진작업분석(구경 3.5m)

작업 공종		C 공사 현장	
		작업소요시간(mim)	백분율(%)
순굴진 시간	굴진	138,775	29.6
	Resetting	20,575	4.4
	소계	159,350	34.0
Cutter 점검/교환		36,405	7.8
TBM 정비		38,365	8.2
TBM 점검/급유		8,435	1.8
후속설비		41,045	8.8
광차		33,735	7.2
운영교대		67,505	14.4
갱내보강/낙반보강		73,530	15.7
안전/회의		10,605	2.3
총굴진시간		468,975	100

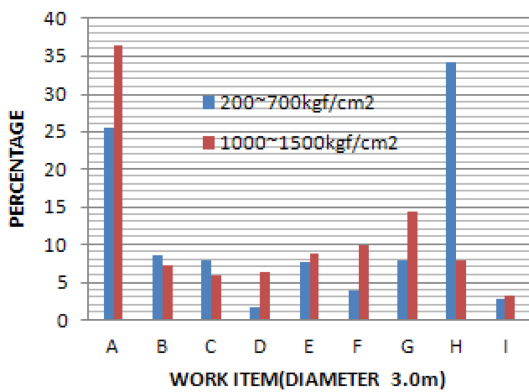


그림 2. A, B 현장 굴진 작업 분석도

굴진시간 125,751분(100%) 중에 32,300분(25.7%)을 차지하였다.

3.2 B 공사현장 작업 생산성 분석

B 공사현장은 TBM 구경 3.0m, 굴진 길이(L) 4,331m, 암질은 화강암 1,000~1,500kg/cm²으로 구성되어 있으며, 전

표 5. 굴진작업분석(구경 3.5m)

작업 공종		D 공사 현장	
		작업 소요시간(mim)	백분율 (%)
순굴진 시간	굴진	135,975	32.6
	Resetting	17,740	4.3
	소계	153,715	36.9
Cutter 점검/교환		48,890	11.7
TBM 정비		26,205	6.3
TBM 점검/급유		14,760	3.5
후속설비		30,730	7.4
광차		24,215	5.8
운영교대		45,080	10.8
갱내보강/낙반보강		54,605	13.1
안전/회의		18,420	4.4
총굴진시간		416,620	100

체 암질이 양호한 특징을 가지고 있었다. B 공사현장의 경우 전체 암질이 양호한 지반으로 갱내보강/낙반보강에는 큰

표 6. 굴진작업분석(구경 3.5m)

작업 공종		E 공사 현장				
		작업 소요 시간(mim)			합 계	백분율(%)
		1공구	2공구	3공구		
순굴진 시간	굴진	255,760	259,500	77,085	592,346	27.8
	Resetting	45,760	41,820	9,970	97,550	4.6
	소계	301,520	301,320	87,055	689,896	32.4
Cutter 점검/교환		114,430	118,440	28,955	261,825	12.3
TBM 정비		150,200	143,205	35,300	328,705	15.4
TBM 점검/급유		16,690	16,400	8,210	41,300	1.9
후속설비		44,635	65,395	13,255	123,285	5.8
광차		62,920	69,100	24,385	156,405	7.3
운영교대		120,715	111,405	25,615	257,735	12.1
갱내보강/낙반보강		73,812	71,313	17,427	162,552	8.7
안전/회의		49,208	47,542	11,618	108,368	4.0
총굴진시간		934,130	944,120	251,820	2,130,072	100

문제가 없었고, 광차와 운영교대에서 10.0%와 14.4%를 차지하였으며, 순작업량을 나타내는 순굴진시간은 총굴진시간 453,050분(100%) 중에 164,760분(36.4%)을 차지하였다.

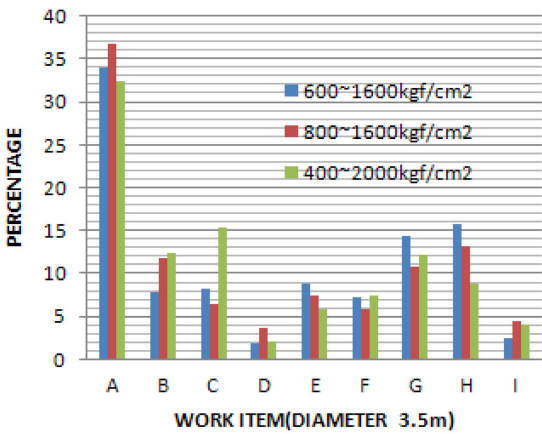


그림 3. C, D, E 현장 굴진 작업 분석도

3.3 C 공사현장 작업 생산성 분석

C 공사 현장은 TBM 구경 3.5m, 굴진 길이(L) 4,361m, 암질은 응회암 600~1,000kgf/cm², 안산암 800~1,600kgf/cm²으로 구성되어 있으며, 전체 압축강도 및 암질양호로 굴진효율이 좋은 특징을 가지고 있었다. C 공사현장의 경우 갱내보강/낙반보강과 운영 교대에서 15.7%와 14.4%를 차지하였고, 순작업량을 나타내는 순굴진시간은 총굴진시간 468,975분(100%) 중에 159,350분(34.0%)을 차지하였다.

3.4 D 공사현장 작업 생산성 분석

D 공사현장은 TBM 구경 3.5m, 굴진 길이(L) 3,835m, 암질은 안산암800~1,600kgf/cm²으로 구성되어 있으며, 전체 압축 강도 및 암질도 비교적 양호한 특징을 가지고 있었다. D 공사현장의 경우 갱내보강/낙반보강과 운영 교대에서 13.1%와 10.8%를 차지하였고, 순작업량을 나타내는 순굴진시간은 총굴진시간 416,620분(100%) 중에 153,715분(36.9%)을 차지하였다.

3.5 E 공사현장 작업 생산성 분석

E 공사현장은 TBM 구경 3.5m, 굴진 길이(L) 18,120m. 암질은 안산암400~1,500kgf/cm², 화강암 600~2,000kgf/cm², 화강섬록암 800~1,800kgf/cm² 등의 암질분포와 국내 최대 단층인 동래 단층대와 소규모 단층대를 통과하는 특징을 가지고 있었다. 본 현장은 터널굴진장이 긴관계로 공기단축을 위해 1, 2, 3 공구로 구분하여 공사를 수행한 현장이었다. E 공사현장의 경우 TBM 정비에서 15.4%, 갱내보강/낙반보강과 운영교대에서 8.7%와 12.1%를 차지하였고, 순작업량을 나타내는 순굴진시간은 총굴진시간 2,130,072분(100%) 중에 689,896분(32.4%)을 차지하였다.

3.6 F 공사현장 작업 생산성 분석

F 공사현장은 TBM 구경 3.8m, 굴진 길이(L) 21,108m, 암질은 안산암 800~1,500kgf/cm² 및 다양한 암질을 보유하고 있었으며, 2공구에서는 소규모 단층대 및 지하수의 과다 유입으로 굴진속도가 저하하는 특징을 가지고 있었다. 본 현장 역시 터널굴진장이 긴관계로 공기단축을 위해 1, 2, 3 공구로 구분하여 공사를 수행한 현장이었다. F 공사현장의 경우 TBM 정비에서 갱내보강/낙반보강과 TBM 정비에서 12.4%와 13.8%를 차지하였고, 순작업량을 나타내는 순굴진시간은 총굴진시간 2,607,225분(100%) 중에 707,071분(27.1%)

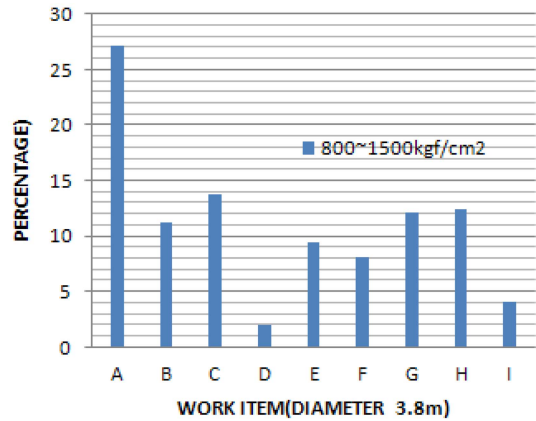


그림 4. F 현장 굴진 작업 분석도

표 7. 굴진작업분석(구경 3.8m)

작업 공종		F 공사 현장				
		작업 소요 시간(mim)			합 계	백분율 (%)
		1공구	2공구	3공구		
순굴진 시간	굴진	189,760	217,000	181,000	587,760	22.5
	Resetting	36,710	48,600	34,000	119,310	4.6
	소계	226,470	265,600	215,000	707,071	27.1
Cutter 점검/교환		98,430	105,800	88,000	292,230	11.2
TBM 정비		113,995	143,670	102,660	360,325	13.8
TBM 점검/습유		13,400	17,480	17,400	48,280	1.9
후속설비		67,580	84,000	93,250	244,830	9.4
광차		62,700	80,790	64,000	207,490	8.0
운영교대		98,950	126,890	89,900	315,748	12.1
갱내보강/낙반보강		83,780	83,780	519,880	176,812	12.4
안전/회의		58,220	58,220	519,880	176,812	4.1
총굴진시간		823,533	985,480	798,210	2607223	100

을 차지하였다.

이 6개 현장을 대상으로 분석한 총굴진시간을 가지고 제 4절에서 굴진속도, 총작업일수 및 총직접공사비를 분석하였다.

4. 구경별 암질에 따른 굴진속도, 총작업일수, 총직접공사비 분석

본 절에서는 앞 절에서 TBM 공법 적용현장 즉, 구경 3.0m의 A, B현장, 구경 3.5m의 C, D, E현장 그리고 구경 3.8m의 F현장을 대상으로 TBM 굴착공법의 총굴진시간을 분석한 자료를 근거로 굴진속도, 총작업일수 그리고 직접공사비를 분석하였다.

4.1 구경별 암질에 따른 굴진시간 분석

앞 절에서 각 현장별로 작업 생산성을 분석한 자료를 근거로 표 8에서와 같이 현장별 총굴진시간 및 평균 굴진시간을 분석하여 정리 하였다. 특히, 구경 3.5m의 C, D E 현장은 암질분포가 큰 차이가 없는 것으로 사료되어 평균 굴진장과 평균 굴진시간을 가지고 평균 굴진속도와 평균 총직접공사비를 함께 분석하였다. 표 8은 암석 분포에 따른 구경별 총굴진시간 및 평균 굴진시간을 분석한 데이터를 나타내고 있다.

4.2 구경별 암질에 따른 굴진속도 및 총작업일수 분석

구경별 암질에 따른 굴진속도 및 총작업일수를 표 9와 같

이 분석하여 제시한 것으로 구경 3.0m의 A, B 현장의 총작업량을 나타내는 굴진속도는 **10.30m/일**와 **13.77m/일**로 분석됐다. A현장이 B현장보다 굴진속도가 다소 높게 나타난 것은 암석의 일축압축강도가 적어 굴진하기에 용이했던 것으로 판단된다. 또한, 구경 3.5m의 C, D, E현장의 총작업량을 나타내는 굴진속도는 **13.39m/일**와 **13.26m/일** 그리고 **12.25m/일**로 분석됐다. 여기서 각 현장마다 굴진속도의 편차의 요인은 암질분포의 차이에 기인한 것으로 사료된다. F현장의 총작업량을 나타내는 굴진속도는 **11.66m/일**로 분석됐다.

현장별 굴진거리별 굴진속도에 따른 총작업일수는 A현장 87.32일, B현장 314.62일, C현장**335.68**일, D현장 289.32일, E현장 **1,479.22**일, F현장 **1,810.57**일로 분석됐다.

따라서 일축압축강도가 200~700kgf/cm²과 1,000~1,500kgf/cm²의 암질분포에서 TBM 장비 구경 3.0m로 작업할 때는 굴진속도 10.30m/일과 13.77m/일을 적용하여 총작업일수를 산정할 수 있다. 또한 일축압축강도가 800~1,500kgf/cm²의 암질분포에서 TBM 장비 구경 3.8m로 작업할 때는 굴진속도 11.66m/일을 적용하여 총작업일수를 산정할 수 있다. TBM 장비 구경 3.5m의 경우 600~1600kgf/cm²의 암질분포에서는 굴진속도 13.39m/일, 800~1,600kgf/cm²의 암질분포에서는 굴진속도 13.26m/일, 400~2,000kgf/cm²의 암질분포에서는 굴진속도 12.25m/일을 적용하여 총작업일수를 산정할 수 있다.

구경 3.5m의 C, D, E현장은 암질분포가 큰 차이가 없는

표 8. 구경별 각 현장의 총굴진시간 및 평균 굴진시간 분석

현장구분	구경(m) 및 거리(m)		암질 분포 일축강도(kgf/cm ²)	총 굴진시간 (min)	백분율 (%)	평균		
						굴진장(m)	굴진시간(min)	백분율(%)
A	구경(3.0)	L=899	편마암 (200~700)	125,742	100	-	-	-
B		L=4,331	화강암 (1,000~1,500)	453,050	100	-	-	-
C	구경(3.5)	L=4,361	응회암 (600~1,000) 안산암 (800~1,600)	468,975	100	8,772	1,005,222	100
D		L=3,835	안산암 (800~1,600)	416,620	100			
E		L=18,120	안산암 (400~1,500) 화강암 (600~2,000) 화강섬록암 (800~1,800)	2,130,072	100			
F	구경(3.8)	L=21,108	안산암 (800~1,500)	2,607,223	100	-	-	-

표 9. 현장별 굴진속도 및 총작업일수 분석

(1일 : 24시간 기준)

현장구분	구경(m)	총 굴진거리(m) (A)	총굴진시간 분(일) (B)	굴진속도(m/일) (A÷B)	총 작업일수(일) [A÷(A÷B)]
A	구경 (3.0)	899	125,742(87.32)	10.30	87.32
B		4,331	453,050(314.62)	13.77	314.62
C	구경 (3.5)	4,361	468,975(325.68)	13.39	325.68
D		3,835	416,620(289.32)	13.26	289.32
E		18,120	2,130,072(1,479.22)	12.25	1,479.22
F	구경 (3.8)	21,108	2,607,223(1,810.57)	11.66	1,810.57

표 10. C, D, E 공사 현장 평균 굴진속도 및 총작업일수 분석

(1일 : 24시간 기준)

현장 구분	구경(m)	C, D, E 공사현장 평균			
		총굴진거리(m) (A)	총굴진시간 분(일) (B)	굴진속도(m/일) (A÷B)	총작업일수(일) [A÷(A÷B)]
C	구경 (3.5)	L=8,772	1,005,222 (698.07)	12.57	698.07
D					
E					

표 11. 각 구경별 굴진속도에 따른 총직접공사비 분석

(1일 : 24시간 기준)

현장구분	구경(m)	암질 분포	직접공사비 (천원/m)	굴진속도 (m/일)	일직접 공사비 (천원/일)	총작업 일수	총직접 공사비(천원)
A	구경 (3.0)	경 암 50% 보통암 30% 연 암 10% 풍화암 10%	4,600	10.30	47,380	87.32	4,137,222
B				13.77	63,342	314.62	19,928,660
C	구경 (3.5)		5,200	13.39	69,628	325.68	22,676,447
D				13.26	68,952	289.32	19,949,193
E				12.25	63,700	1,479.22	94,226,314
F	구경 (3.8)		5,500	11.66	64,130	1,810.57	116,111,854

것으로 사료되어 평균 굴진거리와 평균 굴진시간을 가지고 총작업량을 나타내는 굴진속도와 총작업일수를 분석하였다.

TBM 장비 구경 3.5m로 수로터널공사를 수행할 때 일축 압축강도 400~2,000kgf/cm² 범위의 암질분포에서는 표 10의 굴진속도 12.57m/일을 적용하여 총작업일수를 산정할 수 있다.

구경 3.5m의 평균 굴진속도는 12.57m/일로 이 속도에 해당하는 총작업일수는 698.07일로 분석됐다.

4.3 구경별 암질에 따른 총직접공사비 분석

구경별 암질에 따른 굴진속도에 의한 총직접공사비를 표 11과 같이 분석하였으며, 굴진 1m당 소요 공사비는 수로터널현장으로 경암 50%, 보통암 30%, 연암 10%, 풍화암

표 12. 현장 실적치와 생산성 분석 굴진속도에 따른 총작업일수 검증
(1일 : 24시간 기준)

현장 구분	구경(m)	현장 실적 소요 일수	생산성 분석		
			암질분포 압축강도(kgf/cm ²)	굴진 속도	추정 소요 일수
A	구경(3.0)	87	편마암 (200~700)	10.30	87.32
B		315	화강암 (1,000~1,500)	13.77	314.62
C	구경(3.5)	326	응회암 (600~1,000) 안산암 (800~1,600)	13.39	325.68
D		289	안산암 (800~1,600)	13.26	289.32
E		1,479	안산암 (400~1,500) 화강암 (600~2,000) 화강섬록암 (800~1,800)	12.25	1,479.22
F	구경(3.8)	1,811	안산암 (800~1,500)	11.66	1,810.57

10%의 암질분포를 가진 현장을 대상으로 산출한 것이다.

직접공사비 산정은 TBM 장비 구경 3.0m의 경우 굴진속도가 10.30m/일로 1m당 직접공사비는 4,600천원이다. 일직접공사비는 4,600천원×10.30m/일=47,380천원이 된다.

총굴진거리 899m를 굴착할 때, 소요되는 총직접공사비는 47,380천원×87.32일=4,137,222천원이다. 이와 같은 방법으로 각 구경별로 산정된 총직접공사비는 표 11과 같다.

5. 굴진속도에 따른 총작업일수 검증

본 연구에서 구경별, 암질에 따른 생산성 분석을 통해 도출한 굴진속도를 가지고 총작업일수를 분석한 결과치와 현장 실제 소요일수를 비교분석한 결과는 동일한 것으로 산정됐으며 그 결과는 표 12와 같다. 따라서 구경별 암질에 따른 굴진속도의 결과치는 신뢰성이 있는 것으로 판단됐다.

6. 결 론

국내 대표적인 TBM 장비 보유회사인 000 건설사에서 수행 완료된 TBM 작업굴착보고서의 분석을 통해 암질별, 구경별, 굴진속도(m/일)를 분석하여 도출하였고 그 결과치는 다음과 같다.

1. 일축압축강도 200~700kgf/cm²의 편마암의 암질분포로 구성된 지질조건에서 TBM 구경 3.0m로 수로터널을 굴착할 때는 굴진속도 10.30m/일, 1,000~1,500kgf/cm²의 화강암에서는 13.77m/일을 적용하여 총작업일수를 산정할 수 있다.
2. 일축압축강도 600~1,600kgf/cm²의 응회암과 안산암의 암질분포로 구성된 지질조건에서 TBM 구경 3.5m로 수로터널을 굴착할 때는 굴진속도 13.39m/일, 800~1,600kgf/cm²의 안산암에서는 13.26m/일, 400~2,000kgf/cm²의 안산암, 화강암, 화강섬록암에서는 12.25m/일을 적용하여 총작업일수를 산정할 수 있다.
3. 일축압축강도 800~1,500kgf/cm²의 안산암 암질분포로 구성된 지질조건에서 TBM 구경 3.8m로 수로터널을 굴착할

때는 굴진속도 **11.66m/일**을 적용하여 총작업일수를 산정할 수 있다.

본 연구에서 제시한 굴진속도의 결과치는 향후 독일의 WRITH사에서 개발한 TBM 장비(구경 3.0m, 3.5m, 3.8m)로 수로터널공사를 수행할 때, 공사착수 전 총굴진길이에 따른 개략적인 총공사기간을 산정할 수 있는 유용한 지표로 활용할 수 있다. 또한 9개 분석 작업 항목별 작업생산성 분석 자료는 향후 유사 공사에서 효율성을 판단하는 기준이 될 수 있을 것으로 사료된다. 다만 이들 결과치는 유사조건의 현장 수가 적다는 한계점을 가지고 있으므로 향후 이 연구가 발전적으로 진행될 때는 유사조건의 현장을 발굴하여 데이터 수를 증대하는 노력이 필요하다.

참고문헌

Civil Engineering (1998) Case Studies of Japanese Mountain Tun-

nel Construction.
Dawid Marin (1998) Proven TBM's Turn Power up in Norway Tunneling.
Dohwal Design Company (2000) Ulsan Industrial Water Project Design Report.
Lee, Y. I. (1997) Case Law on the TBM Tunnel Excavation, Korea Journal of the Tunnel.
Nishida, T. and Matsumura, Y. (1993) Rock Mechanical Viewpoint on Excavation of Pressure Tunnel by TBM.
Park, H.T. and Soung, Y.S. (2010) A Study on Efficiency Improvement through Productivity Analysis Based on TBM Operation Data, Journal of the Society of Civil Engineers.
Park, Y. O. (1996) Case Law on the TBM Tunnel at Hard Rock, Korea Journal of Geotechnical Engineering.
Ultra Construction (1993) Tunnel Boring Machine Method.
Ultra Construction TBM tunnel excavation process of technological innovation (2010).

(접수일: 2012.5.11/심사일: 2012.7.24/심사완료일: 2012.8.3)