

국내터널 굴착 사이클타임에 대한 분석결과와 표준품셈과의 비교

김양균¹ · 김형목² · 이승원^{3*}

¹정회원, 한양대학교 자원개발연구소 연구교수

²비회원, 세종대학교 에너지자원공학과 교수

³정회원, 한양대학교 자원환경공학과 교수

An analysis of excavation cycle time for Korean tunnels and the comparison with the Standard of Construction Estimate

Yangkyun Kim¹ · Hyung-Mok Kim² · Sean S. Lee^{3*}

¹Research Professor, Resources Development Institute, Hanyang University

²Professor, Department of Energy and Mineral Resources Engineering, Sejong University

³Professor, Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University

*Corresponding Author : Sean S. Lee, seanlee@hanyang.ac.kr

Abstract

Estimating tunnel construction time and costs are the most fundamental part of a tunnel project planning, which has been generally assessed on a deterministic basis until now. In this paper, excavation cycle time was investigated for two road tunnels and one subway tunnel, and the results were compared with the Standard of Construction Estimate (SE), which is made for the estimation of construction time and cost in a design stage. The results show that the difference in cycle time between SE and actual cycle time is 50%, 7% and 31% respectively for the three tunnels, which means that SE does not reflect practical operation time. The major reasons of the difference are skilled level of tunneling workers, the change of operation sequences for more effective operations, much more complicated working atmosphere in a tunnel than the assumption of SE etc. Finally, even though the results can not be generalized since investigated tunnels are only 3, but it is thought that SE needs to be upgraded into the model able to consider quite common situations through additional tunnel investigation and studies in the future.

Keywords: Tunnel blasting, Cycle time, Standard of Construction Estimate, NTNU estimation model

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
21(1)137-153(2019)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2019.21.1.137>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received November 28, 2018

Revised December 19, 2018

Accepted December 24, 2018



This is an Open Access article
distributed under the terms of the
Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2019, Korean Tunnelling and Underground
Space Association

초 록

터널공사 시간 및 비용의 예측은 터널공사를 계획하는데 있어서 가장 기본적인 사항이며, 우리나라에서는 결정론적 방법에 따라 체계화된 표준품셈에 의해 계산하고 있다. 본 논문에서는 국내 터널 공사기간 또는 사이클타임의 신뢰성 있는 예측모델 구축이라는 장기적인 목표를 위하여, 우선 국내 터널 3개의 현장에 대한 터널굴착시간을 세부공종별로 분석하고, 터널설계시 공사기간을 추정하는 공식적인 방법인 표준품셈에서의 사이클타임과 비교하였다. 그 결과 실제 굴착 사이클타임은 표준품셈대비 3개의 터널 각각 50%, 7%, 31% 수준의 차이를 보였고, 특히 숏크리트와 록볼트 타설시간에서는 각각 171%, 88%로 매우 큰 차이를 보였다. 이에 대한 가장 큰 이유는 표준품셈은 주된 작업공종별로만 작업시간이 분류되어 있어 터널작업자들의 숙련도, 각종 시공장비의 종류 및 사양, 또는 터널굴착작업에서 발생하는 다양한 시공조건을 고려하고 있지 않기 때문이다. 결국 본 연구결과는 현재까지 조사가 이루어진 터널 3개 현장의 특정한 상황에 대해서만 적용될 수 있으므로, 향후 터널굴착 세부작업시간에 대한 지속적인 데이터 축적을 통해 신뢰성 있는 터널굴진시간 예측모델을 구축할 계획이다.

주요어: 터널 발파, 사이클타임, 표준품셈, NTNU 예측모델

1. 서론

터널공사비와 공사기간을 예측하는 것은 터널공사를 계획하는데 있어 가장 기본적인 사항이다(Špačková et al., 2013). 일반적으로 터널공사비와 공사기간을 예측하는 방법은 결정론적 접근과 확률론적 접근, 두 가지로 구분할 수 있다.

결정론적 접근은 하나의 예측값만을 평가하고 예측에 대한 불확실성을 배제하는 방법이다. 따라서 정확하지는 않지만 예측하고자 하는 대상에서 최빈값에 근접한 예측값을 얻을 수는 있다. 확률론적 접근은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 공사비용과 공사기간의 확률적 분포를 분석한다(Špačková, 2012).

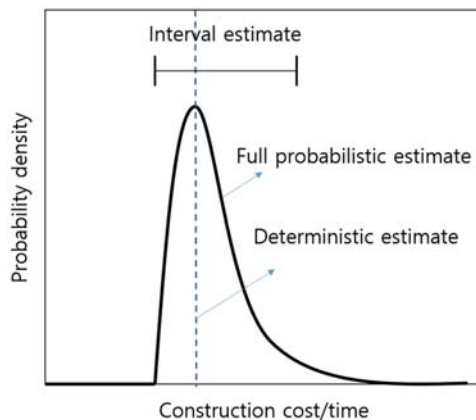


Fig. 1. Possibility of total construction time and cost estimates (Špačková, 2012)

현재 국내 건설공사 설계시 건설공사비와 공사기간의 산정은, 정부 등 공공기관에서 시행하는 건설공사의 적정한 예정가격을 산정하기 위한 일반적인 기준을 제공하는 표준품셈에 근거하여 이루어지는데, 건설공사 중 대표적이고 보편적이며 일반화된 공종, 공법을 기준한 것이며 현장여건, 기후의 특성 및 조건에 따라 조정하여 적용하도록 되어 있다(MOLIT and KICT, 2018). 따라서 표준품셈은 결정론적 접근방법에 의해 수립된 예측방법이라고 할 수 있다.

Doo and Kim (2007)은 우리나라의 터널발파공법에 대한 설계기준과 품셈을 적용하여 설계할 때, 예를 들어 발파 당 굴진장을 3.5 m로 설계하고 시공할 때 3 m 이하로 낮추는 등 불합리한 설계방법과 품셈을 적용하고 있어서 작업시간과 공사기간이 불합리하게 산출되고 있다고 한 바 있다.

주요 공종이 하나의 사이클로 이루어지는 터널굴착에서는 터널의 매 막장이 순차적으로 진행되므로 지질학적, 기술적(장비 및 기계), 경제적인 원인으로 인한 터널굴진 장애요소들이 발생하는 경우 계획된 막장을 바꿀 수가 없기에, 다른 공사에 비해서 건설비용과 기간이 더 크게 증가한다(Salazar, 1983; Isaksson and Stille, 2005). 또한 Kim and Bruland (2009)는 터널굴착 사이클타임은 터널굴착 단면적, 굴진장, 작업자들의 숙련도, 사용 장비와 같은 요소 뿐 아니라, 암질상태에 따른 지보패턴에 따라서도 큰 영향을 받는다고 분석한 바 있다.

결국 장비 및 재료의 발달에 따라 또는 새로운 공법의 적용에 따라 공사기간 또는 사이클타임은 변화하게 되고, 이를 포함한 다양한 상황을 유연하게 고려할 수 있을 때 보다 신뢰성 있는 공사기간 예측이 가능해진다. 이와 관련하여 Min et al. (2003)은 터널의사결정체계중의 하나인 DAT기법을 시공 중인 병설터널현장에 적용하여 지질 조건 및 굴착패턴 등에 따른 다양한 공사기간 및 공사비를 분석한 바 있다.

따라서 본 논문에서는 국내 터널 공사기간 또는 사이클타임의 신뢰성 있는 예측모델 구축이라는 장기적인 목표를 위하여, 터널공사 세부 공종별 실제 작업시간 및 사이클타임을 분석하고, 터널설계시 공사기간을 추정하는 공식적인 방법인 표준품셈과의 비교하였다. 다만 현재까지 조사된 터널 3개 현장에 대해서만 분석과 비교가 이루어져 그 결과를 일반화할 수는 없기에 향후 지속적인 연구를 통해 장기적으로 본 연구결과를 보완해 나갈 계획이다.

2. 조사 현장 개요

본 연구를 위해 조사된 터널현장 3곳의 개요는 Table 1과 같으며, 터널단면의 형상은 Fig. 2와 같다. 터널 A와 B는 도로터널이고 터널 C는 단면이 상대적으로 작은 지하철터널이다. 터널 A는 조사기간 동안 전단면으로 굴착된 반면 터널 B와 C는 상하반 분할굴착공법이 적용되었다. 따라서 터널 B와 C의 사이클타임은 상부 반단면에 대해서만 조사되었다.

또한 천공장은 암질에 따라 일반적으로 1.0~3.5 m이다. 천공시 터널 A와 C는 재래식 점보드릴이 사용되었지만, 터널 B는 컴퓨터 점보드릴이 사용되었다. 슛크리트 두께는 암질에 따라 5~16 cm이며, 허용 여굴량은 10~20 cm (MOLIT, 2016)이다. 여굴은 슛크리트와 콘크리트로 채워야 하므로, 슛크리트 두께는 규정 두께에 여굴의 50%를 더한 두께가 된다(MOLIT, 2016). 예를 들면 터널 A의 표준단면 3에서의 규정은 슛크리트 두께는 8 cm이고

허용 여굴량이 15 cm이므로 전체 슛크리트 두께는 15.5 cm가 된다. 터널 C는 도로터널이 아닌 지하철터널이므로 지보패턴에 대한 규정이 터널 A 및 B와 다르다.

Table 1. Summary of the investigated tunnels

Tunnel name		Tunnel A	Tunnel B	Tunnel C
Use		Road	Road	Subway
Construction period		2011~2015	2010~2014	2009~2014
Tunnel length (m)		1,950	1,670	987
Rock type		Granite	Granite/Shale	Gneiss
The number of investigated rounds		9	5	4
Rock mass quality (RMR)		40~60	20~40	20~40
Cross sectional area (m ²)		93.8	78.6 (top heading: 52.6)	54.0 (top heading: 28.2)
Tunnel type ^{a)}		Group C	Group C	Group B
Drilling	Type	Conventional	Computerized	Conventional
	The number of booms	3	3	2
	Diameter of drill hole (mm)	45	45	45
	Drill length (m)	3.2	1.6	1.3
	Round length (m)	3.0	1.5	1.2
	The number of holes	143	107 (top heading)	78 (top heading)
Explosives	Type	Emulsion	Emulsion	Emulsion
	Charging weight (kg)	299.5	70.5 (top heading)	35.9 (top heading)
Diameter of ventilation duct (mm)		1,700	1,600	600
Loading capacity of loader (m ³)		5	5	3.52
Shotcrete	Type	SFRS ^{b)}	SFRS ^{b)}	SFRS ^{b)}
	Thickness (cm)	15.5 (7.5+8)	19.5 (7.5+12)	22.5 (7.5+15)
	Volume (m ³)	11.7	5.5	3.7
Rock bolt	Number per round	15.5 (15 or 16)	10.5 (10 or 11) (top heading)	9.5 (9 or 10) (top heading)
	Length (m)	4	4	4

a) Presented in Table 3

b) Steel fiber reinforced shotcrete

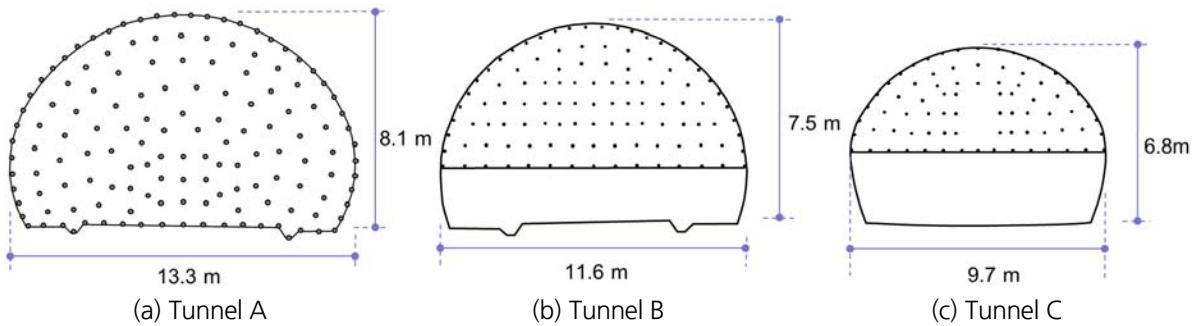


Fig. 2. Cross section shapes and drill patterns of the investigated tunnels

Table 3에서 나타난 바와 같이, 표준품셈에서 B군(Group B)은 “굴착시 점보드릴로 천공은 가능하나 덤프트럭과 로더의 작업이 원활하지 못하고 장비의 교행이 불가능한 규모의 단선급 터널”으로 규정하고 있다. 따라서 터널 A 및 B와는 달리, 단면이 작은 터널 C에서 터널 내 다양한 설비 및 도구 등으로 장비 교행이 원활하지 않았던 실제 작업상황을 고려하여 터널 C를 B군(Group B)로 구분하였다.

한편 터널 굴착과정 또는 수행되는 세부 공종은 터널마다 다를 수 있다. 예를 들어 암질이 양호한 터널에서는 별도의 보조공법 없이 슛크리트와 록볼트만으로 지보를 완료할 수도 있지만, 불량한 터널에서는 포어폴링(Fore-polling) 또는 강지보 등과 같은 추가적인 지반보강 대책이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 터널간 사이클타임을 동일한 항목에 대해 비교하기 위하여 일반적인 굴착 및 지보 과정, 즉, 천공 및 장약, 환기, 버력반출, 부석정리, 슛크리트와 록볼트 시공시간만을 사이클타임에 포함시켰다.

각 터널에서의 현장조사와 작업일지에 근거하여 실제 시공시간을 조사하였으며, 상기 각 세부 공종이 시작할 때부터 종료할 때까지의 시간을 실제 시공시간으로 기록하였다. 작업 중 발생한 장비고장이나 작업조 교체시의 중단시간 등 일상적인 작업시간이 아닌 시간은 실제 시공시간에서 제외하였다.

한편, 실제 터널굴착작업에서, 록볼트공은 록볼트 타설시 천공되는 것이 아닌 발파공 천공 후에 연속해서 천공하는 것이 일반적이다. 따라서 이러한 현실적인 상황을 고려하여 록볼트공 천공시간은 록볼트 타설시간(Rock bolting)에 포함되는 것이 아닌 천공 및 장약시간(Drilling & charging)에 포함시켰다.

3. 표준 품셈에서의 사이클타임 산정

터널굴착 설계시 1회 발파시 굴착시간 또는 사이클타임의 예측은 일반적으로 표준품셈에 규정된 세부공종별 작업시간에 근거하여 이루어지는데, Table 2와 같이 구성된다. Table 2에서 MOLIT는 국토교통부(Ministry of Land, Infrastructure and Transport), KICT는 한국건설기술연구원(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)의 약칭이며, Group A, B, C는 터널 형식 또는 규모에 대한 정의로서 Table 3에 나타나 있다.

Table 2. Cycle time by the Standard of Construction Estimate (MOLIT and KICT, 2018)

Operation		Tunnel type (unit: minute)					
		Group A		Group B		Group C	
		SE ^{a)}	App. ^{b)}	SE ^{a)}	App. ^{b)}	SE ^{a)}	App. ^{b)}
Drilling & charging	① Preparation	10~15	12.5	15~20	17.5	-	0
	② Marking	5~10	7.5	10~15	12.5	15~20	17.5
	③ Pure drilling	T1	T1	T1	T1	T1	T1
	④ Charging & blasting	30~40	35	40~50	45	50~60	55
	⑤ Ventilation	15~20	17.5	20~25	22.5	25~30	25.5
Loading & hauling	① Preparation	10	10	10	10	10	10
	② Pure loading & hauling	T2	T2	T2	T2	T2	T2
	③ Delay time ^{c)}	3~5	4	3~5	4	-	0
Scaling		20~30	25	30~40	35	40~50	45
Shotcrete	① Preparation	10	10	10	10	-	0
	② Cleaning the face	T3	T3	T3	T3	T3	T3
	③ Installing steel ribs	25~30	0 ^{d)}	30~35	0 ^{d)}	40~45	0 ^{d)}
	④ Fixing wire mesh	T4	0 ^{e)}	T4	0 ^{e)}	T4	0 ^{e)}
	⑤ Placing shotcrete	T5	T5	T5	T5	T5	T5
	⑥ Cleaning the rebounded shotcrete	20	20	20	20	20	20
	⑦ Checking the machine	10	10	10	10	10	10
Rock bolts	① Preparation	10	10	10	10	-	0
	② Drilling (min/hole)	T6	T6	T6	T6	T6	T6
	③ Cleaning hole (min/hole)	1	1	1	1	1	1
	④ Grouting holes (min/hole)	2	2	2	2	2	2
	⑤ Inserting Rock bolts (min/hole)	2	2	2	2	2	2
	⑥ Moving the machine	15	15	15	15	15	15

a) Operation time by SE

b) The median value of SE that is applied for this study

c) Delay time from the interference between machine in two-way transport

d) It is assumed that steel ribs are not installed because the installation time for steel ribs was not considered when checking actual cycle time

e) Wire mesh is not used in the tunnels investigated for this study

Table 3. Definition of tunnel type (MOLIT and KICT, 2018)

Tunnel type	Definition
Group A	A small tunnel where hand drills are used for blasting
Group B	A one lane-size tunnel where a drilling jumbo can be used for blasting, but two way transport of machine is not possible
Group C	A two lane-size tunnel where a drilling jumbo is used and two way transport of machine is possible

상기 Table 2에서 천공 및 장약시간(“Drilling & Charging”)에는 천공작업 준비, 순수 천공, 장약, 발파, 환기까지의 작업과정을 포함하는 시간이다. 또한 T1, 천공시간은 오직 암반 천공시간에 소요되는 시간만을 의미하며,

식 (1)에서 주어진 바와 같이 Table 4에 나타난 점보드릴의 천공속도와 설계상 총 천공길이에 따라 달라진다.

$$T1(\text{min}) = \frac{\text{Drill length} \times \text{The number of drill}}{\text{Drilling rate} \times \text{The number of drilling booms}} \quad (1)$$

T2는 버력처리에 소요되는 시간이며, 식 (2) 및 (3)과 같이 버력의 부피와 상차장비의 용량에 따라 결정된다.

$$T2(\text{min}) = V/Q \quad (2)$$

$$Q(\text{m}^3/\text{hr}) = 3600 \cdot q \cdot k \cdot f \cdot E/\text{cm} \quad (3)$$

여기서, V (m³): 버력부피,

Q (m³/hr): 운전시간 당 작업량,

q (m³): 버킷 용량,

k: 버킷계수(모래, 사력보통토, 점토, 역질토 등 직접 자연상태에서 굴착 적재 할 수 있는 여건으로 버킷에 평적에 약간 미달되게 채울 수 있을 때0.9),

f: 체적환산계수(1/L, L: 흐트러진 상태의 체적/자연상태의 체적, Table 5 참조),

E: 작업효율(보통0.55),

cm (sec): 1회 사이클 시간(= m · l + t₁ + t₂, 보통: 1.8 · 8 + 18 + 14 = 46.4초),

- m (sec/m): 계수(타이어식 1.8 sec/m, 무한궤도식 2.0 sec/m),

- l (m): 편도주행거리(표준 8 m),

- t₁ (sec): 버킷에 토량을 담는데 소요되는 시간(타이어식 로더로 산적상태에서 담고, 현장작업조건이 곤란한 경우 18초),

- t₂ (sec): 기어변화 등 기본시간과 다음 운반기계가 도착할 때까지의 시간(폼셈에서는 14초를 기준).

Table 4. Drilling rate of drilling jumbos (MOLIT and KICT, 2018)

Round length (m)	Drilling rate (cm/min)		Remarks
	SE ^{a)}	Application ^{b)}	
<1.2 m (weathered rock)	75~85 cm/min	80.0 cm/min	For tunnel Group B and C (hand drills are used for Group A)
1.2~2.0 m (soft rock)	85~90 cm/min	87.5 cm/min	
2.0~3.0 m (medium rock)	90~95 cm/min	92.5 cm/min	
3.0 m< (hard rock)	95~100 cm/min	97.5 cm/min	

a) By SE: for the percussion power of 15 kW

- Includes time for moving between holes, collaring and cleaning the hole

b) The median value of SE that is applied for this study

Table 5. Typical range of load factor

Rock strength		Hard rock	Medium hard rock	Soft rock	Weathered rock
L	Range ^{a)} (median value)	1.70~2.00 (1.85)	1.55~1.70 (1.625)	1.30~1.50 (1.40)	1.30~1.35 (1.325)
	Load factor (f)	0.54	0.62	0.71	0.75

a) MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport) and KICT (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology) (2018)

T3는 바닥청소 및 면정리에 소요되는 시간을 의미하며 표준품셈에는 64 m²/hr으로 지정되어 있다.

$$T3(\text{min}) = A/64 \tag{4}$$

여기서, A (m²): 슛크리트가 타설될 면적.

T4는 와이어메쉬 설치시간이지만, 최근의 터널에서는 와이어메쉬를 사용하지 않으므로 사이클타임에는 포함되지 않는다. T5는 슛크리트 타설시간이며, 식 (5) 및 (6)에 의해서 계산된다.

$$T5(\text{min}) = V/Q \tag{5}$$

$$Q(\text{m}^3/\text{hr}) = q \cdot E(1 - \text{Rebound} \%) \tag{6}$$

여기서, V (m³): 슛크리트 타설 대상 수량,

Q (m³/hr): 슛크리트 실제 타설속도,

q (m³/hr): 슛크리트 기계의 능력(보통: 13 m³/hr),

E: 효율(보통: 0.55),

Rebound %: 반발되어 떨어진 슛크리트 전중량/타설된 슛크리트 전체 중량 × 100, 상반에서는 15%, 하반에서는 10%.

T6는 록볼트 천공에 소요되는 시간이며 식 (7)에 의해 산정된다. 식 (7)에서 록볼트 천공 길이는 록볼트의 길이에 여유로 0.1 m씩 추가로 천공하는 것을 가정한다.

$$T6(\text{min}) = \frac{(\text{Rock bolt length} + 0.1) \times \text{The number of rock bolt holes}}{\text{Drilling rate} \times \text{The number of drilling booms}} \tag{7}$$

4. 분석 결과

4.1 실제 터널현장의 작업시간

Fig. 3은 Table 1에서 제시된 3개의 터널에 대해 실제 막장에서 세부 작업별 작업시간과 사이클타임을 나타낸다.

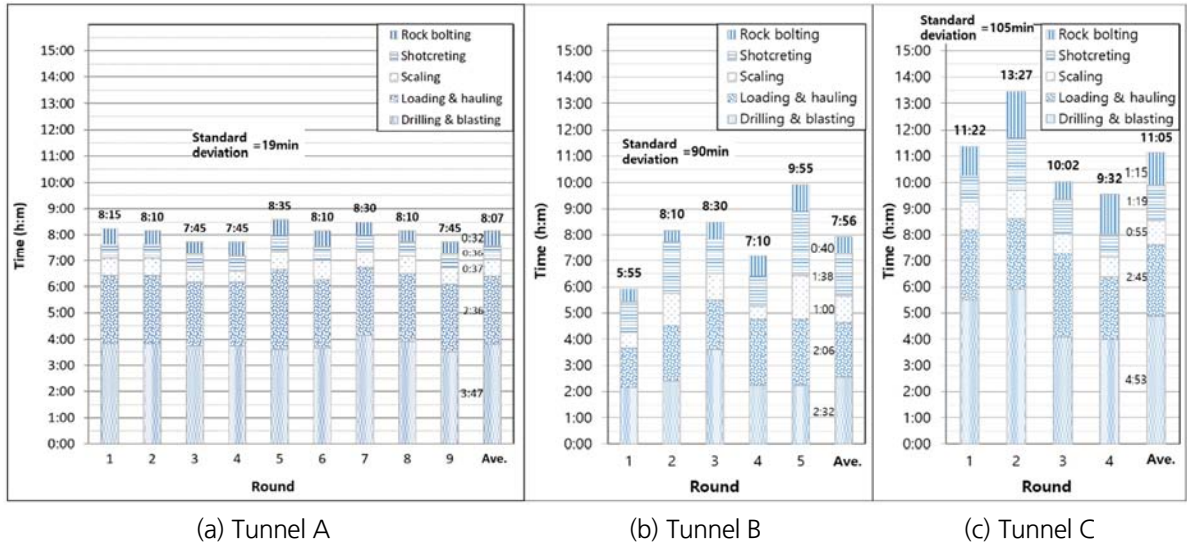


Fig. 3. Comparison of cycle time for the 3 tunnels

총 9회의 발파굴진에 대한 작업시간이 조사된 터널 A의 평균 사이클타임은 8시간 7분으로 나타났으며, 천공 및 장약작업에 3시간 47분이 소요되어 사이클타임에서 가장 많은 비율(47%)을 차지하고 있다. 전체 9회의 발파굴진에 대하여 다른 터널에 비해 변화가 매우 적은 편(사이클타임 표준편차 = 19분)이며, 이것은 터널 A에서의 공사담당자가 공정관리를 상당히 엄격하게 진행하였을 뿐 아니라, 터널굴진작업 상당히 진행된 상태에서 작업자들이 각자의 담당 업무에 대해 이미 숙달되었기에, 세부 작업간 대기시간이 거의 없는 상태로 진행되었기 때문으로 해석된다.

5회의 발파굴진이 조사된 터널 B의 평균 사이클타임은 7시간 56분이며 이중 약 32%가 천공 및 장약작업에 소요되었다. 3개 현장 중 사이클타임(7시간 56분)이 가장 작게 나타나고 있는데, 이것은 터널 B가 조사된 구간이 상부 반단면 굴진구간이어서 굴착 단면적도 작았기도 하지만, 컴퓨터 점보드릴을 사용해서 천공을 하였기에 천공 시간을 줄일 수 있었고, 버력처리에 사용된 로더의 용량이 터널 A에서 사용된 장비와 동일하여 버력처리 시간을 줄일 수 있었기 때문으로 분석된다.

또한 4회의 발파굴진에 대한 작업시간이 조사된 터널 C에서의 평균 11시간 5분으로 조사된 터널 3곳 중에서 가장 긴 사이클타임을 나타내고 있는데, 이것은 터널 C가 지하철터널이어서 터널 A 및 B에 비해 굴착 단면적, 천공수 및 천공깊이도 작았지만 사용장비의 규격이나 성능도 다른 두 터널에 사용된 것에 비해 상대적으로 낮았고, 상반만 굴착을 하는 상황이었기에 작업장비의 교차 통행이 어려웠기 때문으로 사료된다. 터널 C의 조사 막장별 사이클타임 변화(표준편차 = 105분)가 상대적으로 크게 나타나고 있는 이유도 이러한 작업상황과 밀접한 관련이 있는 것으로 사료된다. 천공 및 장약작업에서 가장 오랜 시간(44%)이 소요되고 있는데 이것은 작업자들의 낮은 숙련도뿐 아니라 터널 C에 사용된 점보드릴 형식이 매우 구식이어서 작업속도도 느리고 암질도 좋지 않아 천공 후 공벽이 무너진 구멍들이 많아 장약시 암편들을 제거하느라 많은 시간이 소요되었기 때문이다.

4.2 표준품셈과의 비교

Table 1에서 제시된 터널규격 및 작업상황을 이용하여 Table 2에 주어진 표준품셈에 의한 사이클타임 산정을 위한 변수, T1~T6를 계산하였으며(Table 6), 이 값을 Table 2에 대입하여 산출한 표준품셈에 의한 사이클타임과 실제 작업시간을 비교한 결과를 Table 7에 나타내었다. Fig. 4는 각 세부 작업별 작업시간의 분포와 표준품셈에 의한 작업시간을 나타낸다.

Table 7에서 천공 및 장약(“Drilling & Charging”)시간에는 표준품셈에서 규정하고 있는 작업과정, 즉, 천공작업 준비, 순수 천공, 장약, 발파, 환기까지의 작업시간이 포함된다.

‘2장 조사 현장 개요’에서 언급한 바와 같이, 실제 터널굴착작업에서는, 록볼트공은 록볼트 타설시 천공되는 것이 아닌 발파공 천공 후에 연속해서 천공하는 것이 일반적이다. 따라서 이러한 현실적인 상황을 고려하여 실제 작업시간에서의 록볼트공 천공시간은 Table 7 및 Fig. 4에서는 록볼트 타설시간(Rock bolting)에 포함되는 것이 아닌 천공 및 장약시간(Drilling & charging)에 포함되었으며, 마찬가지로 표준품셈에 의한 작업시간에서도 Table 2의 록볼트 천공시간(② Drilling’)도 Table 7에서는 ‘Drilling & blasting’ 시간에 포함되었다. Table 7 및 Fig. 4에서 ‘Ac’는 실제 작업시간을, ‘SE’는 표준품셈에 의해 예측된 작업시간을 의미한다.

Table 6. Results of the variables defined in Table 2

Variables		Tunnel A	Tunnel B	Tunnel C
T1 (min)	Time for pure drilling holes	144.3	65.2	57.9
T2 (min)	Time for pure loading & hauling	103.9	36	22.5
T3 (min)	Time for cleaning face	86.1	26.2	15.2
T4 (min)	Time for fixing wire mesh	0	0	0
T5 (min)	Time for placing shotcrete	98.2	53.0	23.7
T6 (min)	Time for drilling rock bolt holes	22.9	20.9	22.3

Table 7. Comparison of operation time in actual operations and by SE

Operation	Operation time (min)									Average ^{c)} absolute %
	Tunnel A			Tunnel B			Tunnel C			
	Ac ^{a)}	SE ^{b)}	Difference (%)	Ac ^{a)}	SE ^{b)}	Difference (%)	Ac ^{a)}	SE ^{b)}	Difference (%)	
Drilling & Charging	227	267	41 (18)	152	243	91 (60)	293	238	-55 (-19)	32
Loading & hauling	156	114	-42 (-27)	126	46	-80 (-63)	165	37	-128 (-78)	56
Scaling	37	45	8 (21)	60	45	-15 (-25)	55	35	-20 (-36)	27
Shotcreting	36	214	179 (503)	98	109	11 (11)	79	79	0 (0)	171
Rock bolting	32	93	61 (192)	40	68	28 (69)	75	73	-3 (-3)	88
Cycle time	487	733	246 (50)	476	511	35 (7)	666	461	-205 (-31)	30

- a) Actual operation time: an average of the investigated rounds
- b) Operation time by SE
- c) Average of absolute values for the difference % of each tunnel

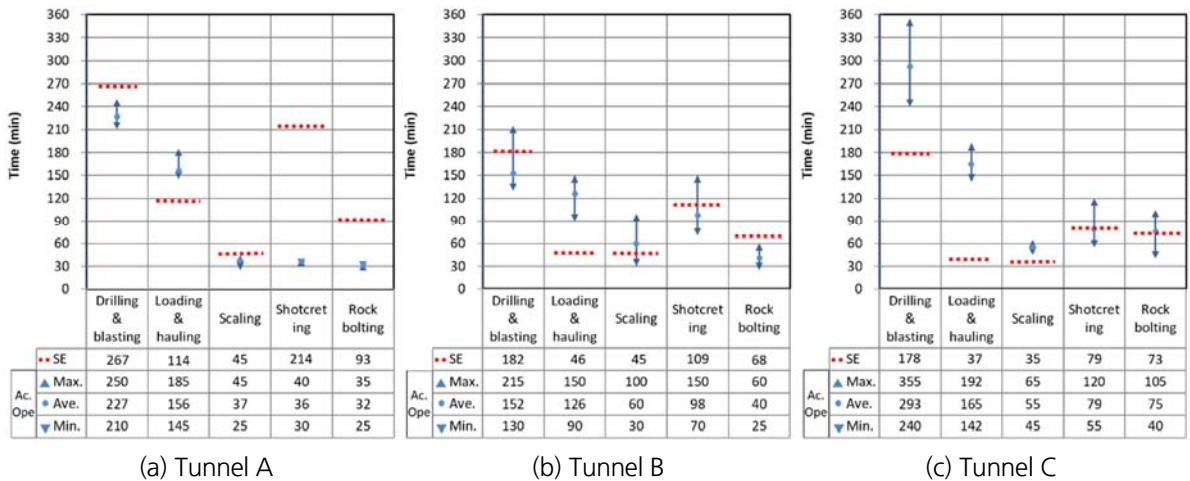


Fig. 4. Ranges of operation time in actual operations and by SE

4.2.1 표준품셈에서의 사이클타임

분석결과, SE에 의한 사이클타임은 터널 A, B, C의 순서로 많이 소요되는 것으로 나타났는데, 이것은 표준품셈에서 사이클타임을 계산할 때 변수가 되는 T1~T5 (식 (1)~(6))의 값들이 터널단면적에 따라 크게 좌우되기 때문이다. 예를 들어, T1에서 천공수는 대체로 터널단면적이 증가할수록 증가하며, T2에서의 버력부피, T3에서의 숏크리트 타설면적, T5에서의 숏크리트 타설부피도 터널단면적이 증가할수록 당연히 증가하기 때문이다.

그러나 T6의 록볼트 타설시간은 록볼트의 수와 길이에 따라 좌우되는데 이것은 터널의 단면적 못지않게 암질에 따라 크게 변화하므로, Table 6에 나타난 바와 같이, 단면적이 넓은 터널 A와 암질이 좋지 않은 터널 C가 거의

유사한 작업시간을 나타냈다.

결국 단면적(93.8 m^2)이 가장 큰 터널 A의 사이클타임은 733분으로 3개 터널 중 가장 커서 단면적이 가장 작은 (28.2 m^2) 터널 C의 사이클타임 461분보다 약 1.6배 큰 것으로 나타났으며, 단면적이 52.6 m^2 인 도로터널 B는 지하철터널 C보다 50분 정도 사이클타임이 큰 것으로 계산되었다.

4.2.2 실제 작업과 표준품셈에서의 사이클타임 비교

SE와 Ac의 사이클타임 차이를 분석한 결과 도로터널인 A와 B각각에 대하여 SE가 Ac에 비해 50%, 7% 오래 소요되는 것으로 계산되었으나, 지하철터널인 C의 경우는 SE가 Ac보다 31% 적게 소요되는 것으로 계산되어, 세 터널 평균적으로는 30%의 차이를 나타냈다.

터널 A에서 SE와 Ac가 가장 큰 차이를 나타내고 있는데 그 주된 이유는 숏크리트 타설시간에서 Ac는 평균 36분정도였지만, SE는 214분으로 계산되었기 때문이다. 이것은 SE에서 포함된 바닥청소 및 면정리 시간, 잔재 제거, 장비점검이 실제로는 거의 수행되지 않고 곧바로 숏크리트가 타설되었고, 실제 숏크리트 타설시 규정된 숏크리트 두께만 타설된 채 여굴채움 등 면정리 작업은 어느 정도 굴진이 진행된 후 한번에 타설되었기에 조사된 숏크리트 작업시간에는 포함되지 않았기 때문이다. 록볼트 타설시간 또한 SE가 Ac보다 192%나 오래 걸리는 것으로 계산되고 있는데, 이것은 SE에서는 공내청소에 16분, 충전 및 정착에 총 62분, 이동에 15분 정도가 소요되는 것으로 계산되었지만, 실제 작업시는 전술하였듯이 작업자들이 이미 작업에 이미 익숙해져 있었기에 록볼트 1개 타설하는데 불과 2분정도의 시간밖에 걸리지 않았기 때문이다.

터널 B에서는 SE와 Ac가 7%정도만 차이나는 것으로 나타나 세 개의 터널 중 SE가 실제 작업시간을 가장 유사하게 예측하고 있었다. 그러나 세부 작업별로는 천공 및 장약, 숏크리트 타설, 록볼트 타설작업에서는 SE가 Ac보다 11~69% 많게 계산되었지만, 버력처리 및 부석처리작업에서는 SE가 Ac보다 25~63% 적게 계산되었다. 록볼트 타설시간은 SE가 Ac보다 69% 많은 것으로 계산되었는데 이것은 SE에서 록볼트 1개에 대한 레진충진과 정착 시간이 총 4분으로 설정되어 있지만 이 현장에서 실제 작업시는 약 3분정도 소요되는 것으로 조사되었고 록볼트 타설을 위해 장비를 이동하는 시간도 SE에서는 15분이 소요되는 것으로 설정하고 있지만 실제로는 보통 2회 정도 이동하여 SE보다 적게 소요되기 때문이다. 또한 버력처리 작업에서 Ac가 SE보다 평균 63% 오래 걸리는 것으로 조사되었는데 이것은 실제 버력처리시 로더가 버력을 덤프트럭에 상차하기 위해 막장에 쌓여있는 버력을 끌어 모아야 하는데 버력의 양이 줄어들수록 끌어 모으는 시간이 증가하고, 덤프트럭의 수가 적정 수보다 적어 순환시간이 일정하지 않았기 때문으로 분석된다.

터널 C에서는 터널 A와는 반대로 SE가 Ac보다 31% 적게 소요되는 것으로 계산되었다. 이에 대한 가장 큰 이유는 버력처리 작업에서 SE에서는 37분으로 계산되었지만 실제 작업은 165분 소요되는 것으로 조사되었는데 이것은 터널 B에서처럼 버력처리 작업시 남아있는 버력의 양이 감소할수록 증가하는 버력 수집 시간과, 품셈에서는 고려하고 있지 못한 복잡한 지하철공사 현장상황 때문으로 분석된다. 즉, 버력반출을 위해 덤프트럭이 도심지를 통과할 때 교통정체로 인해 불규칙한 순환주기 그리고 본 지하철 터널과 같이 반단면의 협소한 터널을 통과해

서 막장까지 진입할 때 터널내부 측면에 놓여있는 다양한 방해물들 때문에 교행이 불가하여 상당히 긴 시간이 소요되지만 이러한 상황을 품셈에서는 적절하게 고려하고 있지 못하기 때문이다.

Fig. 5는 Table 2에서 주어진 표준품셈에서의 세부작업별 최소 작업시간 및 최대 작업시간을 가정하였을 경우 사이클타임 범위와 실제 작업시간의 범위를 비교한 것이다. 전체적으로 터널 A에서는 표준품셈(SE)의 계산결과가 실제(Ac)보다 훨씬 높았지만, 반대로 터널 C에서는 SE의 계산결과가 Ac보다 훨씬 낮았다. 터널 B와 C의 경우, Ac는 각각 355~595분, 572~807분으로 시간 변화의 폭이 컸지만, SE에서는 각각 435~465분, 382~419분으로 매우 좁게 나타나고 있다. 물론 향후 실제 사이클타임에 대한 추가적인 현장조사가 이루어지면, 그 범위와 평균값 등에 다소 변화가 있을 것으로 예상은 되지만, 본 논문을 통해 조사된 터널 3개 현장에 대해서는 현재의 표준 품셈에서의 사이클타임 계산방식은 실제적인 작업시간을 적절하게 반영하지 못하고 있는 것으로 분석되었다.

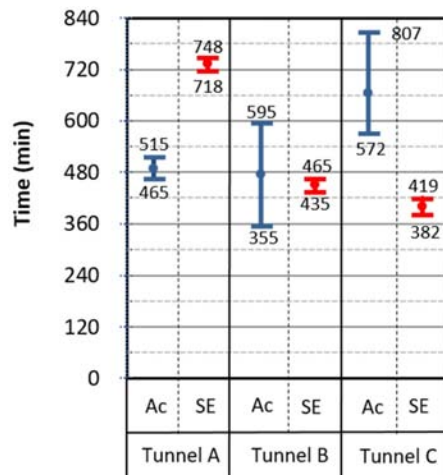


Fig. 5. Comparison of the ranges of cycle time in actual operations and by SE

결국 실제 터널 사이클타임에는 작업자들의 숙련도, 현장의 복잡한 작업환경, 보다 효과적인 작업을 위한 작업 순서 변경, 예상치 못한 상황 등 작업시간에 영향을 미치는 요인은 매우 다양하지만, 표준품셈에서의 사이클타임은 대표적이고 보편적이며 일반화된 공종, 공법, 장비 등을 기준으로 산출되므로 실제 사이클타임과 작업상황 및 조건에 따라 많은 차이를 나타내는 것은 당연하다고 할 수 있다. 이에 대해 많은 연구자들도(John et al., 1987; Kovari et al., 1991; Health and Safety Executive, 1996) 공사계획 또는 입찰단계에서 고려되지 않은 요인 때문에 무시할 수 없을 정도의 공사비 및 공사기간 손실이 발생할 수 있다고 하였다.

한편 노르웨이에서는 NMT (Norwegian Method of Tunnelling) 터널 건설과정을 세부 작업별로 매우 상세하게 구분하고 그에 따라 노르웨이에서 시공되었던 기존의 수많은 터널의 작업시간을 조사하여 데이터베이스화 하였다(NTNU, 1995). 이러한 방대한 자료를 토대로 Kim and Bruland (2009)은 다양한 지보재를 포함하는 발파

터널 굴진시간 예측모델(NTNU drill & blast tunnel construction time estimation model)을 개발하였고 이를 체계화하여 하나의 분석도구(TUNSIM-Q)로 개발하였다. TUNSIM-Q는 일상적인 굴진만을 산정하는 기본굴진시간(Basic construction time), 터널 내 지보 및 보강시간까지도 포함하는 표준굴진시간(Standard construction time), 여기에 터널 방수막, 라이닝, 바닥포장 등 모든 터널작업을 포함하는 전체 터널건설시간(Total construction time)으로 구분된다. Fig. 6은 TUNSIM-Q의 상기 기본굴진시간 중 천공 및 장약시간의 세부항목을 나타내고 있으며 Fig. 7은 기본굴진시간에 영향을 미치는 인자들 간의 상호작용을 나타내고 있다.

Operation	Sub-operation	Case A	
Drilling	Drillhole diameter (mm)	(d_h) 48	
	Drilled length (cm)	(l_b) 500	
	Number of holes basic round length	(a_b) 108.0489	
	Corrected drill length	(k_{cb}) 1.001013	
	Number of dillholes(excl. large drillholes)	(a_n) 108	
	Diameter large drillhole (mm)	(d_g) 102	
	Number of large drillholes	(N_g) 4	
	Type of drilling hammers	AC-COP1838	
	Number of drilling hammers	(N_m) 3	
	Penetration rate(cm/min)	(v_b) 219	
	Correction of penetration for charged holes (%)	(k_{nv}) 100	
	Penetration rate for charged holes (cm/min)	(v_c) 219	
	Correction of penetration rate for large drillhole (%)	(k_{gv}) 42.2	
	Penetration rate for large holes (cm/min)	(v_g) 92.3	
	Drilling time for charged holes (min)	(T_n) 82.3	
	Drilling time for large drillhole (min)	(T_g) 9.0	
	Additional time due to rock quality	-4.6	
	Time for moving per hole (min)	(t_r) 0.75	
	Time for moving (min)	(T_r) 29.0	
	Additional time due to rock quality	14.5	
	Unit time for Rod adding (min)	(t_{st}) 0.0	
	Time for rod adding (min)	(T_{st}) 0	
	Bit changing factor (Change/dm)	(f_b) 0.022	
	Unit time for bit changing (min)	3	
	Time for bit changing (min)	(t_k) 12.9	
Lack of Simultaneousness factor	(f_{sa}) 0.059		
Extra time for lack of simultaneousness (min)	(t_{sa}) 7.7		
Drilling time (min)	150.8		
Charging	Type of explosives	Emulsion	
	Charging method	Separate Charging	
	Number of charging lines	2	
	Time determinant charging time for basic round (min)	(T_l) 50.1	
	Correction for drillhole length	(k_l) 1.00	
	Time determinant charging time (min)	50.1	
	Additional time due to rock quality	16.7	
	Time for charging (min)	66.8	
	Others for drilling and charging	Rig time drilling, charging, blasting (min)	(T_{rb}) 22.3
		Incidental lost time drilling, charging, blasting (min)	(T_{lb}) 26.6
Sum drilling, charging, blasting including rock quality effects (min)		I 266.6	
Ventilation	Ventilation break (min)	II 12.3	

Fig. 6. Drilling & charging part of TUNSIM-Q for the estimation of basic construction time

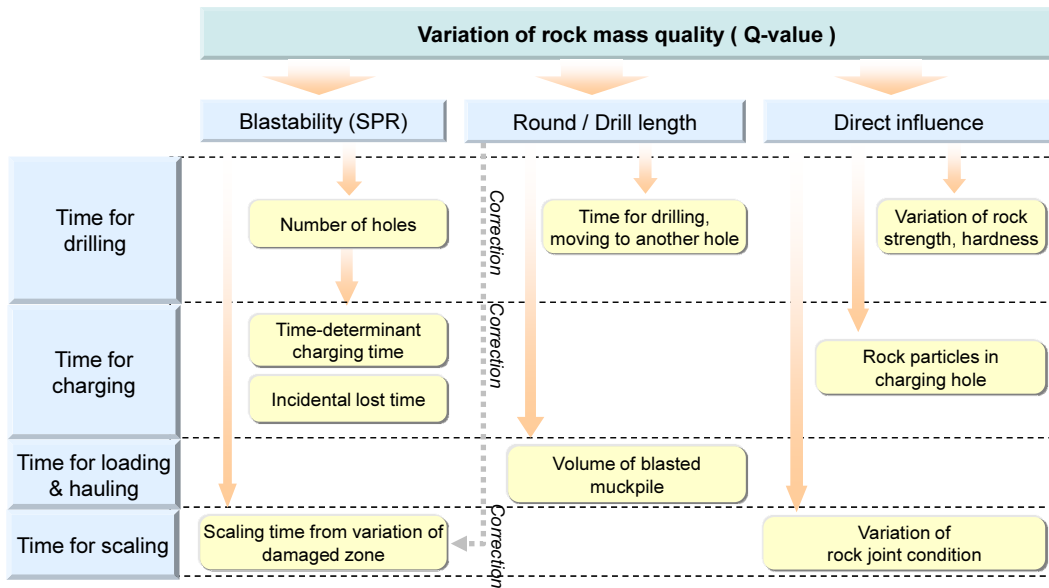


Fig. 7. Flow to estimate the basic construction time in TUNSIM-Q (Kim and Bruland, 2009)

결정론적 접근방법에 의해 설정된 표준품셈을 상기 NTNU 모델처럼 세분화하고 체계화하기는 단기간 내에는 어렵지만, 추가적인 조사를 통해 현재의 표준품셈에서 적용되고 있는 단위 작업 당 소요시간 등을 현실에 맞게 보정하고 각 세부작업별로 비근하게 발생하는 작업상황 등을 고려할 수 있는 항목을 추가한다면 보다 현실적인 사이클타임 추정이 가능하리라 사료된다.

이와는 별도로 본 연구를 수행하면서 얻은 경험과 결과를 토대로 조사방법과 내용을 보완한 후 장기적이고 지속적인 사이클타임 현장조사를 실시할 계획이고, 이를 통해 NTNU 모델과 같이 국내 터널 공사기간 또는 사이클타임의 신뢰성 있는 예측모델을 구축한다면 향후 보다 합리적인 터널공사비 및 공사기간 산정이 가능하리라 사료된다.

5. 결론

본 논문에서는 국내 터널 공사기간 또는 사이클타임의 신뢰성 있는 예측모델 구축이라는 장기적인 목표를 위하여, 현재까지 조사된 터널 3개 현장에서의 세부 공종별 실제 작업시간 및 사이클타임을 분석하고, 터널설계시 공사기간을 추정하는 공식적인 방법인 표준품셈과에서의 사이클타임과 비교하였다. 다만 터널 3개 현장에 대해서만 분석이 이루어져 그 결과를 일반화할 수는 없기에 조사가 이루어진 터널 3개 현장의 특정한 상황에 대해서만 적용될 수 있다고 판단된다. 향후 지속적인 연구를 통해 장기적으로 국내 터널굴착 사이클타임 예측모델을 구축할 계획이며, 그 최종 결과는 보다 합리적인 터널공사비 및 공사기간 산정에 활용될 수 있다고 사료된다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 사이클타임에 포함된 세부 작업은 천공 및 장약(발파 및 환기시간 포함), 버력처리, 부석정리, 숏크리트 타설 시간, 록볼트 타설시간이며, 2개 도로터널(터널 A, B)에서의 사이클타임은 각각 8시간 7분, 7시간 56분이었으나, 지하철터널(터널 C)에서는 11시간 5분이었다. 세부작업 중에는 천공 및 장약작업이 세 터널 평균 41%로 가장 많은 비중을 차지하고 록볼트 타설작업이 9%로 비중이 가장 작았다.
2. 표준품셈에 의한 사이클타임 산정결과 터널 A와 B에서는 각각 12시간 13분, 8시 31분이었고, 터널 C에서는 7시간 41분으로 나타났다. 이것은 실제 작업 사이클타임과 비교해서 각각 50%, 7%, 31%의 차이가 있었고 세 터널 평균 30%의 차이가 나는 것으로 조사되었다.
3. 이렇게 실제 작업시간과 표준품셈에서의 작업시간 차이가 적지 않게 발생하는 원인은 조사된 터널별로 다양했다. 터널 A에서는 숏크리트 타설시간에서 가장 큰 원인이었으며 세부적으로는 작업자들의 높은 숙련도 및 여굴채움 등 면정리는 실제 현장에서는 별도로 수행되었기에 실제 작업시간에는 포함되지 않았기 때문으로 분석되었다. 터널 B에서의 표준품셈은 세 터널 중 실제 작업시간과 가장 근사하게 사이클타임을 예측하고 있었으나, 세부 작업별로는 11~69%의 차이를 나타내고 있었다. 터널 C에서는 버력처리 작업에서 가장 큰 차이가 발생하였고 그 주된 원인은 지하철터널의 복잡한 작업환경 때문에 표준품셈보다 훨씬 많은 시간이 소요되었기 때문으로 분석되었다.
4. 결정론적 접근방법에 의해 설정된 표준품셈을 NTNU 모델처럼 세분화하고 체계화하기는 단기간 내에는 어렵지만, 추가적인 조사를 통해 현재의 표준품셈에서 적용되고 있는 단위 작업 당 소요시간 등을 현실에 맞게 보정하고 각 세부작업별로 비근하게 발생하는 작업상황 등을 고려할 수 있는 항목을 추가한다면 보다 현실적인 사이클타임 추정이 가능하리라 사료된다.

감사의 글

이 논문은 한양대학교 교내연구지원사업으로 연구되었으며(HY-2018년도), 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. Doo, J., Kim, J. (2007), "A study on the Standard of Construction Estimate by performed construction cost and design of a drill & blast tunnel in Korea", Proceeding of the Korea Society for Explosives and Blasting Engineering, pp. 211-219.
2. Health and Safety Executive (1996), Safety of new Austrian tunnelling method tunnels - a review of sprayed concrete lined tunnels with particular reference to London clay, HSE Books, Suffolk, pp. 86. Downloaded from <http://www.hse.gov.uk/pubns/natm.html>.
3. Isaksson, T., Stille, H. (2005), "Model for estimation of time and cost for tunnel projects based on risk evaluation", Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 38, No. 5, pp. 378-398.
4. John, M., Wogrin, J., Heissel, G. (1987), "Analyse des verbruches im Landrückentunnel", Baulos Mitte.

Felsbau, Vol. 5, No. 2.

5. Kim, Y., Bruland, A. (2009), "Effect of rock mass quality on construction time in a road tunnel", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 24, No. 5, pp. 584-591.
6. Kovari, K., Fechtig, R., Amstad, Ch. (1991), "Erfahrungen mit vortriebsmaschinen grossen durchmessers in der Schweiz", *Proceedings of the STUVA-Tagung 1991*, Vol. 34, Düsseldorf, pp. 24-33.
7. Min, S., Kim, T., Einstein, H., Lee, J., Kim, H. (2003), "A study on construction simulation of road tunnel using Decision Aids for Tunneling (DAT)", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 5, No. 2, pp. 161-174.
8. MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport) (2016), *Practical design technique for construction of national road*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Seoul, pp. 414-415.
9. MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport), KICT (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology) (2018), *Standard of construction estimate for civil, building and machine facility*, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Koyang, pp. 407-414.
10. NTNU (NTH) (1995), *Tunnelling-Prognosis for drill and blast*, Project Report 2B-95, NTNU (Norwegian University of Science and Technology), pp. 1-56.
11. Salazar, G.F. (1983), *Stochastic and economic evaluation of adaptability in tunneling design and construction*, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, pp. 24-57.
12. Špačková, O. (2012), *Risk management of tunnel construction projects*, Ph.D. Thesis, Czech Technical University in Prague, pp. 6-8.
13. Špačková, O., Šejnoha, J., Straub, D. (2013), "Probabilistic assessment of tunnel construction performance based on data", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 37, pp. 62-78.