

주방식 지하구조물의 발파 굴착공정 분석 연구

이철호¹ · 현영환² · 황제돈³ · 최순욱⁴ · 강태호⁵ · 장수호^{6*}

¹정회원, 한국건설기술연구원 지반연구소 전임연구원

²정회원, ㈜에스코컨설턴트 부장

³정회원, ㈜에스코컨설턴트 사장

⁴정회원, 한국건설기술연구원 지반연구소 전임연구원

⁵정회원, 한국건설기술연구원 지반연구소 수석연구원

⁶정회원, 한국건설기술연구원 지반연구소 선임연구위원

A study on the excavation cycle by the drill-and-blast method for a room-and-pillar underground structure

Chul-Ho Lee¹, Young-Hwan Hyun², Je-Don Hwang³, Soon-Wook Choi⁴, Tae-Ho Kang⁵, Soo-Ho Chang^{6*}

¹Geotechnical Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Research Specialist

²ESCO Consultant & Engineers Co., Ltd, Department head

³ESCO Consultant & Engineers Co., Ltd, President

⁴Geotechnical Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Research Specialist

⁵Geotechnical Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Senior Researcher

⁶Geotechnical Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Senior Research Fellow

ABSTRACT: Since a room-and-pillar underground structure is characterized by its grid-type array of room and pillar, its economical efficiency can be governed by excavation sequence. In this study, the construction period by the drill-and-blast method as a excavation method for a room-and-pillar underground structure was examined. In addition, the parallel excavation sequence was considered as the main sequence of a room-and-pillar underground structure. Sequences of mucking and support installation were derived to estimate the total excavation cycle by taking the case of a road tunnel into consideration. From the excavation cycle of room-and-pillar underground structure, the relationship between available maximum and minimum numbers of jumbo drill machines depending on the number of faces in operation was suggested.

Keywords: Room-and-pillar method, Drill-and-Blast, Excavation, Sequence, Construction period

초 록: 주방식 지하구조물은 룸과 암주로 이루어진 격자 형태의 지하구조물로 굴착순서에 따라 주방식 지하구조물의 시공성과 경제성이 좌우될 수 있다. 선행연구에서는 주방식 지하구조물의 굴착공정에서 중요하게 다뤄질 수 있는 발파굴착 공정을 장비 운영과 현행 발파 규정 및 건설공사 표준품셈에 근거하여 검토하였다. 굴착공법으로는 점보드릴을 이용한 발파공법을 가정하였으며, 기존 연구에서 제시한 가로·세로 병행시공방식으로 검토하였다. 연구에서 고려한 단면의 크기에 따라 필요한 착암 공정에 대한 천공시간을 산정하였으며 기존 도로터널 사례를 통해 버력처리 및 지보재 설치 공정의 소요시간을 산정하였다. 굴진면 운용 수를 고려하여 굴착 사이클을 산출하였으며 이를 통해 운영가능한 천공장비의 최대 대수와 최소 대수를 수식화하여 제시하였다.

주요어: 주방식 공법, 발파굴착, 굴착, 공정, 공사기간

1. 서 론

*Corresponding author: Soo-Ho Chang

E-mail: sooho@kict.re.kr

Received October 25, 2016; Revised November 8, 2016;

Accepted November 16, 2016

주방식 공법(Room-and-pillar method)은 수평 또는 거의 수평으로 매장되어 있는 광물을 효율적으로 채광할 수 있는 굴착공법으로서 여러 굴착면에서 동시

에 채광이 진행되기 때문에 생산성과 효율성이 높은 공법으로 알려져 있다(Hartman and Mutmansky, 2002; Darling, 2011; Esterhuizen et al., 2011; Lee et al., 2015). 그런데 지하공간 건설 측면에서 주방식 공법은 기존 자원개발에서의 주방식 채광과는 다르게 공간 구조물의 중장기적인 안정성 확보에 더욱 주안점을 두어 천장부와 암주부가 연계된 하나의 통합 구조물로 설계가 이루어져야 한다는 것이 큰 차이점이라고 할 수 있다(Lee et al., 2014a; Lee et al., 2015). 이러한 주방식 공법의 지하공간 활용 기술은 미국과 유럽을 중심으로 활용되고 있으며 대표적인 사례인 미국 캔사스시티의 Subtropolis는 기존 석회암 광산을 활용하여 물류센터, 우편물 집중국, 사무실 등의 대규모 상업 지하공간으로 활용하고 있다(Carmody and Sterling, 1993).

주방식 채굴을 위해서 암반의 강도가 크지 않은 경우에는 컨티뉴어스마이너(continuous miner)와 같은 기계식 채굴장비를 이용하여 룸(room) 굴착, 광물 운반 및 천단보강의 순으로 암주와 룸을 순차적으로 형성하게 된다. 그러나 우리나라 도심지 대부분의 경우, 비교적 양호한 암반이 천층부에 존재하여 연암을 대상으로 한 컨티뉴어스마이너와 같은 광산장비의 적용이 어렵기 때문에 발파공법의 적용이 필수적이라고 할 수 있다. Lee et al. (2015)는 주방식 굴착공정의 최적 설계를 위하여 발파공법을 가정한 계획공정에 따른 안정성을 검토하고 기존 연구(Lee et al., 2014) 결과를 통해 지반 조건이 일정하다는 가정아래 가로·세로 병행시공 방식이 주방식 공법으로 적합하다고 제시하였다.

일반적인 NATM 터널에서 주요 굴착 공정은 천공·발파, 버력처리, 슛크리트, 록볼트 설치 등(Chun et al., 2006)으로 구분되는데, 주방식 굴착에 소요되는 모든 요소들을 고려하여 공정을 도출하기 어렵기 때문에(Lee et al., 2015), 발파 공정 중 발파 허용시간, 발파 사이클 타임 및 계획부지 규모에 따른 굴착장비 운용시간을 대상으로 하여 주방식 공법의 굴착공정을

검토하였다. 또한 지하공간 개발에 필요한 여러 공정 중 굴착공정이 공사기간 및 공사비 측면에서 많은 부분을 차지하기 때문에 본 연구에서도 굴착공정을 주요 인자로 다루었다. 다만, 굴착공사에 의해 생성되는 굴진면의 개수에 따라 천공장비(점보드립)의 운영 방식이 바뀌기 때문에 선행 연구에서 고려한 굴착과정에서 굴착공정 가운데, 굴착면의 개소 수에 따라 가장 효율적인 천공장비의 운용이 가능한 굴착 공정을 도출하고자 하였다. 따라서 본 연구에서는 효율적인 발파 공정 분석을 위해 실제 발파 굴착 사례 분석을 통한 발파 허용시간 검토와 공정별 투입시간을 분석하여 각 공정간 소요시간을 검토하였고 단면별 공정 비교를 통해 경험적으로 제시된 천공개수와 발파패턴 설계를 통한 천공개수를 비교하여 천공시간을 검토하였다. 또한 발파굴착에 의해 형성되는 굴진면의 운영 개수와 천공 및 버력처리를 위한 천공장비의 최적 조합 방식을 검토하였다.

2. 주방식 지하구조물의 굴착공정 검토 조건

선행 연구(Lee et al., 2015)에서는 가로·세로 병행시공 방식과 가로·세로 순차시공 방식 중, 주방식 구조

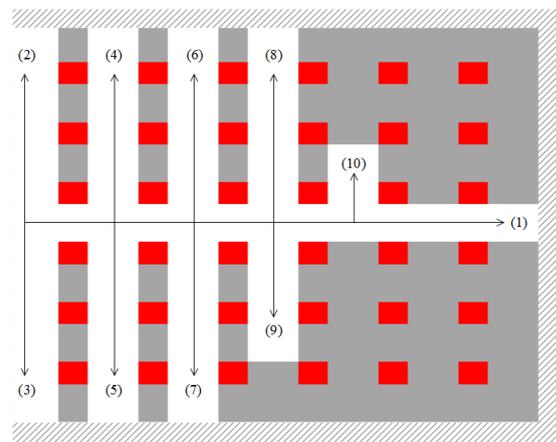


Fig. 1. Parallel excavation scheme of a room-and-pillar underground structure (Lee et al., 2015)

물을 구성하는 림과 암주의 안정성, 장비 운영 효율성 및 시공 관리성을 비교하여 Fig. 1과 같은 가로·세로 병행시공 방식이 보다 효율적인 굴착 순서인 것으로 제시하였다.

이때, 발파 허용시간은 서울지역 일출·일몰 시간을 고려하여 12시간으로 적용하였다(Lee et al., 2015). 국토교통부 건설공사 표준품셈(MOLIT, 2011)의 터널공사 발파 허용시간에 따라, 주방식 지하구조물의 발파굴착 사이클 타임을 분석하기 위해 굴착단면적에 따른 천공수를 검토하여, 천공시간을 산정하였고 천공준비, 측량 및 마킹 시간을 고려하면 주방식 지하구조물에 사용되는 천공장비의 1회 발파당 천공시간은 약 3.2 시간으로 산정되었다. 이와 같이 산정된 천공시간을 발파 허용시간과 비교하면 천공장비 1대를 운영할 때 암주의 높이가 3 m 암주간 폭이 6 m인 경우 적정한 굴진면의 개소수는 1일에 3개로 검토되었다(Lee et al., 2015).

이상의 선행 연구에서 고려한 계획 부지의 크기에 따른 굴착공정을 검토한 결과(Fig. 2), 30×30~48×48 m 규모에서는 천공장비 1대, 그리고 계획부지 57×57 m 규모에서는 천공장비 2대가 적정할 것으로 나타났다. 또한 이상과 같은 결과들을 바탕으로 도출된 추세선을 분석한 결과, 계획부지 면적이 66×66 m 및 75×75 m일 경우에는 적정한 천공장비의 운영 대수는 각각 3대 및 4대로 추정되었다(Lee et al., 2015). 본 연구에서는

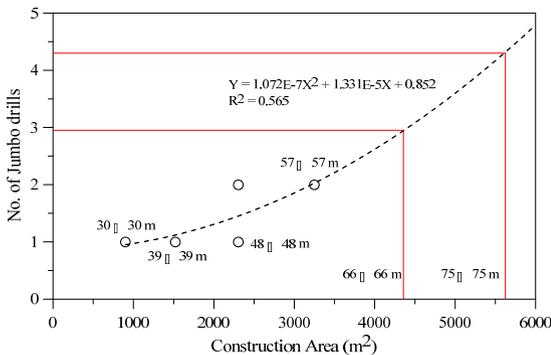


Fig. 2. Relationship between required equipments and construction area (Lee et al., 2015)

이상의 선행 연구에서 천공수 산정에 고려한 동일한 경험적 검토 방법들(Svanholm et al., 1977; Hoek and Brown, 1980; KEC, 2000)과 더불어, 실제 발파패턴 설계를 통해 도출된 천공수를 서로 비교하고 사이클 타임을 검토하였다.

3. 주방식 지하구조물의 굴착 공정 검토

본 연구에서 고려한 발파에 의한 굴착 공정 검토 시에는 주방식 지하구조물의 단면 형상과 크기를 고려하여, 기존 발파 굴착 사례 분석을 통한 실제 발파 허용시간, 각 주요 공정별 시간, 경험식과 발파패턴 설계 결과에 따른 단면 크기별 천공시간, 굴진면 운용수에 따른 천공 및 버력처리에 필요한 장비조합 등을 주요 검토 사항들로 선정하였다. 또한 기존 발파굴착 사례로서 ○○지역 도로병설터널의 1일 시공 사이클 타임(cycle time)을 참고하였다.

본 연구에서 고려한 주방식 지하구조물의 단면 높이는 주거 및 사무실 용도일 때는 3 m, 그리고 물류창고 기준일 때에는 6 m로 고려하였다. 이때 단면의 폭은 주거 및 사무실 용도일 경우 6~15 m, 그리고 물류창고일 경우에는 6~30 m로 고려하였다.

3.1 발파 굴착 사이클타임의 사례분석

지하공간 건설 과정은 크게 착암, 버력처리, 슛크리트, 록볼트 등의 네 가지 주요 공정으로 구성되는데, 각 공정별 적용시간은 굴착방법(기계식 또는 발파) 및 지하공간의 단면적에 따라 달리 적용하고 있다(MOLIT, 2011). 일반적인 발파굴착 시공 사이클타임은 Table 1과 같이 착암, 버력처리, 슛크리트 및 록볼트 설치 순서로 순차적으로 이루어지며 발파공정이 포함된 착암공정이 공사기간 산정에 큰 영향을 미친다. 이는 착암공정에서는 굴진면 수, 발파 허용 시간, 천공 장비 수급 등의 이유로 공정 산정에 어려움이 많기 때문이다.

Table 1. Sequence cycle for the excavation of an underground structure

Sequence	Cycle	Equipment	Possibility of night works
Drilling	[Grey bars in cycle]	Jumbo Drill and Blasting	×
Mucking	[Red bars in cycle]	Loader or dump truck	○
Shotcrete	[Blue bars in cycle]	Shotcrete spraying machine	○
Rockbolt	[Yellow bars in cycle]	Rockbolt installation machine (or Jumbo drill)	○

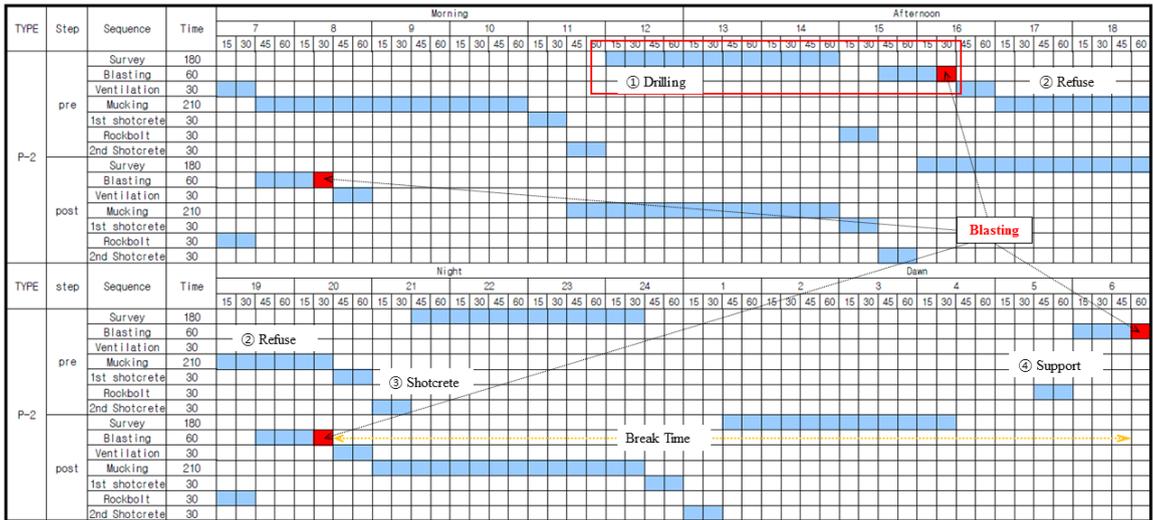


Fig. 3. An example of one day cycle time of a road tunnel case

Fig 3는 ○○지역 병렬 도로터널의 1일 시공 사이클타임의 예제로서, 착암 공정, 버력처리, 슛크리트, 록볼트 설치가 순차적으로 이루어지며 특히 야간에는 발파 작업을 수행하지 않은 것을 알 수 있다. 일반적인 터널공사에서는 굴진면의 안정성 확보를 위해 착암공정에서 지보재 설치까지 가능한 한 짧은 시간이 요구된다. 따라서 굴진면에 근접하여 작업을 수행하는 착암, 버력처리, 슛크리트 공정 간의 시간을 최소화해야 하며, 위 3가지 공정에 의해 대부분의 1일 사이클타임이 결정된다고 할 수 있다.

지보재 공정인 록볼트 시공은 착암공정의 천공장비(점보드릴)를 함께 사용해야 하므로 착암공정의 천공작업 이후 지보재 공정인 록볼트 시공 작업이 수행되

어야 하며, 이러한 공정이 끝나고 천공장비가 다른 굴진면으로 이동한 뒤에 발파 및 환기, 버력처리, 슛크리트 공정이 이루어진다. 따라서 록볼트 공정은 크게 착암공정 시간에 포함되어 수행되어야 하므로, 본 연구의 사이클타임 분석 시에는 효율성을 고려하여 착암, 버력처리 및 슛크리트의 세 가지 공정으로 사이클타임을 분석하였으며 이때 전체 공정에 걸쳐 버력처리는 원활하게 이루어지는 것으로 가정하였다. Table 2는 ○○지역 도로병설터널의 공정별 시간을 분석한 결과이다.

이상의 도로터널 사례에서는 1일 2발파 수행 시에 2번째 사이클에서 야간 천공이 이루어진 다음 1일 발파 허용 시간에 의해 바로 발파를 수행하지 못하고

Table 2. Daily construction cycle of the sampled road tunnel

Sequence		1 cycle (hr)	2 cycle (hr)	Proportion (%)	Note
① Drilling	Survey and blasting	3.0	3.0	31.6	
	④ Rockbolt	0.5	5.5	5.3	Support 0.5 hr Waiting time 5.0 hr
	Charging and Blasting	1.0	1.0	10.5	
	Ventilation	0.5	0.5	5.3	
② Mucking		3.5	3.5	36.8	
③ Shotcrete		1.0	1.0	10.5	
Subtotal		9.5	14.5		
Total		24			1 day cycle

5시간의 발파대기 후 일출시간에 맞춰 발파를 수행하는 사이클로 이루어져 있다. 또한 전체 공정에서 각 세부 공정이 차지하는 시간 비율을 분석한 결과(Table 2 참조), 록볼트 설치시간을 포함한 착암 공정이 52.7%를 차지하고 있어서 공기단축을 위해 가장 우선 고려되어야 할 공정이 착암공정임을 알 수 있다. 또한 착암공정에서 가장 시간이 오래 걸리는 세부 공정은 측량 및 천공으로서 천공장비의 운용계획이 중요한 요소임을 알 수 있다.

본 연구에서 사례로 제시한 병렬 도로터널에서는 터널 굴진면당 1일 2발파를 수행하여 1일 총 4발파를 수행하는 것으로 되어 있다. 이는 선행연구(Lee et al., 2015)에서 제시한 1일 3발파보다 1회 많은 것으로 이는 발파 시간과 관련이 있는 것으로 보인다. 이상의 도로터널의 사례에서는 20시 30분에 마지막 발파를 수행하는 것으로 되어 있는데 이는 화약류 사용 허가 조건(1일 12시간 허용시간)에 맞지 않는다. 하지만 검토 대상 사례의 현장에서는 관할 경찰서장 등과 협의하여 일몰직후에도 발파가 가능하였던 것으로 추정되나 이러한 조건은 현장상황에 따라 다르게 적용될 것으로 판단된다.

3.2 주방식 지하구조물의 단면 검토

국토교통부의 건설공사표준품셈(MOLIT, 2011)

에 따르면 터널 굴착 방법에 따른 1발파당 사이클타임을 세 가지로 규정하고 있다. 첫 번째 A군은 기계굴착 시에 소형브레이커 사용이 가능하거나 발파굴착시 착암기로 천공할 수 있는 소규모 터널로 규정하고 있으며, B군은 기계굴착 시에 대형 브레이커를 사용하는 단선급 터널이거나 발파굴착 시 점보드릴로 천공은 가능하나 덤프트럭과 로더의 작업이 원활하지 못하고 장비의 교행이 불가능한 규모의 단선급 터널로 규정하고 있다. 마지막으로 C군은 기계굴착 시 대형 브레이커의 사용이 가능한 복선급 터널 또는 2차로 이상의 터널이거나 발파굴착 시 점보드릴로 천공이 가능하며 차량 교행은 물론 덤프트럭과 로더의 작업이 원활하고 장비의 교행이 가능한 복선급 터널 또는 2차로 이상의 터널로 규정되어 있다(Lee et al., 2015). 대표적으로 A와 B군에 대해 본 연구에서 고려하는 주방식 지하구조물의 규모를 Table 3에 나타내었다. 본 연구에서 고려하는 주거 및 사무실용 주방식 지하구조물(높이 3 m)은 B군에 해당하는 단선급 터널(single-lane tunnel) 규모에 해당하며, 물류창고의 경우에는 장비교행이 어려울 수 있는 6×6 m 규모를 제외한 다른 경우들은 모두 복선급 터널(double-lane tunnel) 규모로 분류하였다.

굴착 단면적에 따른 장비조합은 B군일 경우 점보드릴(2부), 로더 및 덤프트럭으로 구성된다. 천공장비의 천공속도는 암반등급별로 구분되는데, 본 연구에서는

Table 3. Classification of room-and-pillar underground structures with different geometries

Use	Height (m)	Width (m)	Area (m ²)	Tunnel Group (MOLT, 2011)	Comparable tunnel size
Residence or Office	3	6	20.0	B	Single-lane
		9	31.5	B	
		12	44.0	B	
		15	57.6	B	
Warehouse	6	6	38.0	B	Double-lane
		12	80.0	C	
		18	123.1	C	
		24	168.1	C	
		30	220.1	C	

Table 4. Drilling time of a room-and-pillar underground structure (Lee et al., 2015)

Sub-cycles	Structure type		Note
	Tunnel (B or C group)	Room-and-Pillar underground structure	
Preparation (min)	10~20	15	Median value
Survey and marking (min)	10~25	17	Median value
Drilling (min)	T1		Eq. (1)

Table 5. Geometries of room-and-pillar underground structures considered in this study

Use	Height (m)	Width (m)	Rock mass class					Note
			Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5	
Residence or Office	3	6	○	○	○	○	○	Group B
		9	○	○	○	○	○	
		12	○	○	-	-	-	
		15	○	-	-	-	-	
Warehouse	6	6	○	○	○	○	○	Group C
		12	○	○	○	○	○	
		18	○	○	-	-	-	
		24	○	○	-	-	-	
		30	○	-	-	-	-	
Drilling length (m)			3.5	2.0	1.5	1.2	Blasting design	
Drilling rate (cm/min)			97.5	92.5	87.5	80	Average	

B군 또는 C군 터널에 적용되는 1회 굴진장이 3.0 m인 경암지반으로 가정하였다(Table 4). 또한 본 연구에서는 주방식 지하구조물의 규모와 암반등급에 따라 적용이 가능한 단면 조건을 Table 5와 같이 기존 연구 (Lee et al., 2014b)에서 검토한 룸의 높이와 폭의 비율에 따른 설계대상 단면으로 적용하였다. 주방식 지하

구조의 사이클 타임을 검토하기 위해 천공준비, 측량·마킹, 장약 및 발파 시간은 건설공사표준품셈(MOLT, 2011)에 제시된 각 해당 군의 시간을 평균하여 적용하였으며, 천공시간은 식 (1)에 의해 산정되었다(Lee et al., 2015). 이때 착암 공정 중 천공준비, 측량·마킹 및 천공에 걸리는 시간은 B군과 C군이 동일하였다.

$$T1 = \text{Total drilling length (m)} / \text{Speed of drilling (m/min)} / \text{Number of boom (EA)} \quad (1)$$

3.3 주방식 지하구조물의 천공수 검토

건설공사표준품셈(MOLIT, 2011)에서 제시하고 있는 시간과 기존 발파 사례에서 나타난 시간을 비교하여, 주방식 지하구조의 단면 규모에 따라 천공준비, 측량 및 마킹 시간을 차등 적용하였으며 그 결과는 Table 6과 같다. 여기서 천공시간은 앞선 식 (1)과 같이 총 천공장(m)을 천공속도(m/min)와 천공장비 붐대수로 나눈 값이 된다.

터널 발파는 다양한 실험 및 경험식들에 의해 설계 될 수 있으나, 일반적인 벤치(bench) 발파와 비교할 때 여러 가지 변수요인들이 많아서 장약량 계산방식이 상대적으로 어려운 부분이 있다. Lee et al. (2015)은 한국도로공사(KEC, 2000)의 ‘터널 발파작업 시공관리’에서 제시한 정상적인 발파조건을 기준으로 하여 다음과 Fig. 4와 같이 발파면적에 따른 천공수를 제안한 바 있다. 그러나 경험적으로 도출된 이 방법에 의한 천공수 산정은 단면적 110 m² 이하의 조건에서만 적용이 가능하기 때문에 본 연구 대상인 주방식 지하구조물에 대해서는 주거 및 사무실 용도의 네 가지 단면과 물류창고형 용도의 두 가지 단면에서만 적용이 가능하다. 본 연구에서는 이상과 같은 경험적인

방법으로 도출되는 천공수와 실제 발파패턴 설계로부터 도출된 심발공, 확대공 및 최외곽공의 개수를 비교하고자 하였다.

Table 7은 대표적으로 주거 및 사무실 용도의 3×6 m 단면에 대해 경험적인 방법과 실제 발파패턴 설계(Fig. 5)로부터 도출된 천공수를 비교한 것이다. 3×6 m 단면에서는 경험적인 방법과 비교할 때, 발파패턴 설계로부터 도출된 천공수는 암반등급 Type 1과 2에서 18공이 감소하였으며 Type 4, 5 및 6의 경우에는 각각 14공, 6공 및 1공이 감소하였다. 물류창고형 주방식 구조에서는 앞서 기술한 바와 같이 단면 면적이 110 m² 이상(너비 18 m 이상)인 관계로 경험적인 방법을 적용하기 어렵기 때문에 발파패턴 설계만을 적용하였다.

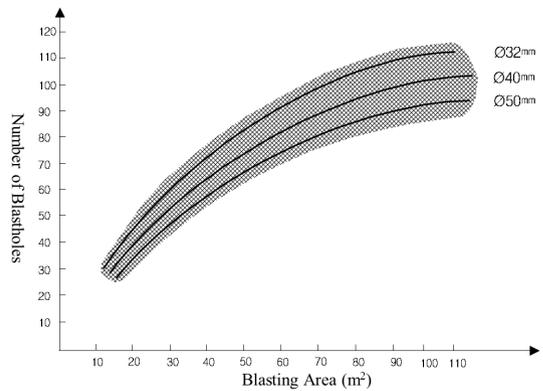
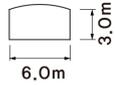


Fig. 4. Number of blastholes depending on area of excavation (KEC, 2000)

Table 6. Time for drilling preparation and survey

Use	Height (m)	Width (m)	Area (m ²)	Group	Equipment	Preparation (min)	Survey and Marking (min)
Residence or Office	3	6	20.0	B	Jumbo drill (2-boom)	10	15
		9	31.5	B		10	15
		12	44.0	B		11	15
		15	57.6	B		11	16
Warehouse	6	6	38.0	B	Jumbo drill (2-boom)	10	15
		12	80.0	C		13	16
		18	123.1	C		15	17
		24	168.1	C		17	18
		30	220.1	C		20	20

Table 7. Comparison between an empirical method and a blasting design pattern (H=3 m, W=6 m)

Cross-sectional geometry	Area (m ²)	20.01	Perimeter (m)	18.11
	Group	B	Equipment	2-boom Jumbo
	Preparation	10 min	Survey	15 min

Type	Advance	Hole depth	Empirical method			Design pattern				(2)-(1)
			No. of blastholes	Smooth Blasting	Total (1)	Center cut	Stopping	Contour	Total (2)	
1~2	3.5	3.8	36	27	63	16	6	23	45	▼18
3	2.0	2.2				16	8	25	49	▼14
4	1.5	1.65				16	15	26	57	▼6
5	1.2	1.3				16	17	29	62	▼1

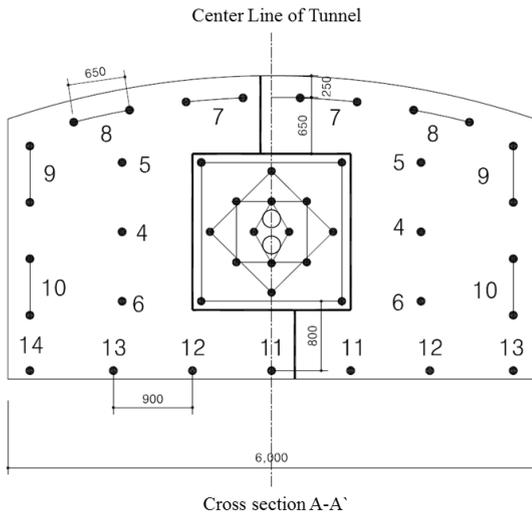


Fig. 5. Designed blasting pattern of the 3×6 m room-and-pillar underground structure

이상과 같은 방식으로 모든 검토 대상 단면들에 대해 천공장과 천공시간을 검토한 결과를 Table 8에 정리하였다. 검토 결과, 주방식 지하구조물의 단면별 천공수는 모든 단면 조건에서 경험적인 관계로부터 도출된 천공수보다 실제 발파패턴 설계로부터 도출된 천공수가 상대적으로 적었다. 이는 경험적인 방법에 의한 천공수 산정법은 과거 발파 사례들을 분석하여 작성된 반면, 실제 발파 설계결과는 최신의 화약기술이 반영된 결과로 판단된다. 과거에는 터널 단면적과

터널 외경에 근거하여 발파 천공수를 계산하고 모든 지보패턴에 대해 동일한 천공수를 적용하였다. 하지만 현재는 지반특성을 고려하여 지보패턴별로 굴진장과 천공간격을 달리 적용하고 있다. 또한 최근에는 과거의 화약보다 성능이 강화된 화약이 사용되므로 폭굉압(detonation pressure)이 높아져서 발파효율이 과거보다 향상되었다. 따라서 최근의 발파패턴 설계에서는 단면의 형상, 지반의 종류 및 특성을 고려하면서 화약의 성능을 효과적으로 발휘할 수 있도록 설계를 수행하고 있기 때문에, 과거의 경험적인 설계방법과 비교할 때 동일한 굴착 단면적 조건에서 천공간격이 커지고 천공수가 감소되어 천공효율이 향상되는 경향을 보인다.

3.4 주방식 지하구조물의 발파굴착 사이클 타임 분석

앞서 산정한 주방식 지하구조물의 단면 크기별 천공수 산정결과를 토대로 건설공사표준품셈(MOLIT, 2011)의 착암공정 중 천공준비, 측량 및 마킹, 천공시간을 합산하면 Table 9와 같다. 주방식 지하구조물에서 사용될 천공장비의 1일 굴진면 작업수는 1일 발파 허용시간을 1회 발파 시의 천공시간으로 나누어 계산할 수 있다. 이를 모든 검토대상 단면 조건들에 적용한

Table 8. Total drilling length and net drilling time for room-and-pillar underground structures

Use	Size (m)	Equip.	Rockmass Type	Drilling rate (cm/min)	Total drilling length (m)		Net drilling time (min)	
					Empirical	Design	Empirical	Design
Residence or Office	3×6	2-boom	1~2	97.5	239.4	171	122.8	87.7
			3	92.5	138.6	107.8	74.9	58.3
			4	87.5	103.95	94.05	59.4	53.7
			5	80	81.9	80.6	51.2	50.4
	3×9	2-boom	1~2	97.5	330.6	258.4	169.5	132.5
			3	92.5	191.4	167.2	103.5	90.4
			4	87.5	143.55	127.05	82.0	72.6
			5	80	113.1	102.7	70.7	64.2
	3×12	2-boom	1~2	97.5	418	353.4	214.4	181.2
	3×15	2-boom	1	97.5	490.2	425.6	251.4	218.3
Warehouse	6×6	2-boom	1~2	97.5	364.8	285	187.1	146.2
			3	92.5	211.2	187	114.2	101.1
			4	87.5	158.4	141.9	90.5	81.1
			5	80	124.8	122.2	78.0	76.4
	6×12	3-boom	1~2	97.5	547.2	471.2	187.1	161.1
			3	92.5	316.8	316.8	114.2	114.2
			4	87.5	237.6	247.5	90.5	94.3
			5	80	187.2	215.8	78.0	89.9
	6×18	3-boom	1~2	97.5	-	706.8	-	241.6
	6×24	3-boom	1~2	97.5	-	904.4	-	309.2
6×30	3-boom	1	97.5	-	1208.4	-	413.1	

Table 9. Total drilling time for room-and-pillar underground structures

Use	Size (m)	Equip.	Rockmass Type	Preparation (min) ^(a)	Survey (min) ^(b)	Net drilling time (⊙, min)		Total drilling time (Ⓐ+Ⓑ+⊙, min)	
						Empirical	Design	Empirical	Design
Residence or Office	3×6	2-boom	1~2	10	15	122.8	87.7	147.8	112.7
			3			74.9	58.3	99.9	83.3
			4			59.4	53.7	84.4	78.7
			5			51.2	50.4	76.2	75.4
	3×9	2-boom	1~2	10	15	169.5	132.5	194.5	157.5
			3			103.5	90.4	128.5	115.4
			4			82.0	72.6	107.0	97.6
			5			70.7	64.2	95.7	89.2
	3×12	2-boom	1~2	11	15	214.4	181.2	240.4	207.2
	3×15	2-boom	1	11	16	251.4	218.3	278.4	245.3
Warehouse	6×6	2-boom	1~2	10	15	187.1	146.2	212.1	171.2
			3			114.2	101.1	139.2	126.1
			4			90.5	81.1	115.5	106.1
			5			78.0	76.4	103.0	101.4
	6×12	3-boom	1~2	13	16	187.1	161.1	216.1	190.1
			3			114.2	114.2	143.2	143.2
			4			90.5	94.3	119.5	123.3
			5			78.0	89.9	107.0	118.9
	6×18	3-boom	1~2	15	17	-	241.6	-	273.6
	6×24	3-boom	1~2	17	18	-	309.2	-	344.2
6×30	3-boom	1	20	20	-	413.1	-	453.1	

Table 10. Number of available working faces depending on total drilling time

Use	Size (m)	Equip.	Rockmass Type	Total drilling time (hour)		No. of faces		(2)-(1)
				Empirical	Design	Empirical (1)	Design (2)	
Residence or Office	3×6	2-boom	1~2	2.5	1.9	4.8≒4	6.3≒6	▲ 2
			3	1.7	1.4	7.1≒7	8.6≒8	▲ 1
			4	1.4	1.3	8.6≒8	9.2≒9	▲ 1
			5	1.3	1.3	9.2≒9	9.2≒9	-
	3×9	2-boom	1~2	3.2	2.6	3.8≒3	4.6≒4	▲ 1
			3	2.1	1.9	5.7≒5	6.3≒6	▲ 1
			4	1.8	1.6	6.7≒6	7.5≒7	▲ 1
			5	1.6	1.5	7.5≒7	8	▲ 1
	3×12	2-boom	1~2	4.0	3.5	3	3.4≒3	-
	3×15	2-boom	1	4.6	4.1	2.6≒2	2.9≒2	-
Warehouse	6×6	2-boom	1~2	3.5	2.9	3.4≒3	4.1≒4	▲ 1
			3	2.3	2.1	5.2≒5	5.7≒5	-
			4	1.9	1.8	6.3≒6	6.7≒6	-
			5	1.7	1.7	7.1≒6	7.1≒7	▲ 1
	6×12	3-boom	1~2	3.6	3.2	3.3≒3	3.8≒3	-
			3	2.4	2.4	5	5	-
			4	2.0	2.0	6	6	-
			5	1.8	2.0	6.7≒6	6	-
	6×18	3-boom	1~2	-	4.6	-	2.6≒2	
	6×24	3-boom	1~2	-	5.7	-	2.1≒2	
6×30	3-boom	1	-	7.6	-	1.6≒1		

결과는 Table 10과 같다. 여기서, 1일 발파 허용시간은 선행연구(Lee et al., 2015)에서와 같이 하루 12시간으로 가정하였다. 선행연구(Lee et al., 2015)에서는 6×6 m 단면의 경우 3개의 굴진면 운용이 적합할 것으로 제시되었지만, 본 연구에서 도출한 실제 발파설계 패턴을 적용할 경우 4개의 굴진면을 운영하는 것이 효율적인 것으로 나타났다. 단, 4개의 굴진면을 운영하기 위해서는 1시간의 추가 발파 허용 시간(1일 총 13시간)이 확보되어야 야간에 1회 추가 발파가 가능하다. 그러나 전반적으로 동일한 단면조건에서 천공간격이 상대적으로 넓고 천공수가 작게 산정되는 발파패턴 설계결과를 적용하면 경험적인 방법에 의한 결과보다 천공 시간이 감소되기 때문에 1일 굴진면 작업을 보다 많이 할 수 있는 것으로 나타났다.

4. 주방식 지하구조물의 굴진면 운용에 따른 발파 및 장비 운영 검토

굴착공사에 있어서 굴진면의 개수는 시공장비의 대수, 인력 등의 문제들과 연관되어 공사비와 공사기간에 영향을 미친다. 따라서 굴진면 개수에 따른 발파 및 각 공정 운영에 대한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 주방식 지하구조물에서 굴진면 운영 개수에 따른 발파계획, 장비 운영 등을 검토하기 위해 앞 절에서 언급한 단면 조건 가운데 선행연구(Lee et al., 2015)에서 고려한 6×6 m 단면 조건을 검토하였다. 이때 발파 허용시간은 12시간, 천공장비는 점보드릴을 사용하는 것으로 하였으며 천공 시간 및 공정에 록볼트 설치 시간을 포함하는 것으로 하였다. 또한 2개 이상의



Fig. 6. Cycle time of a 6x6 m room-and-pillar underground structure (1 face operated)

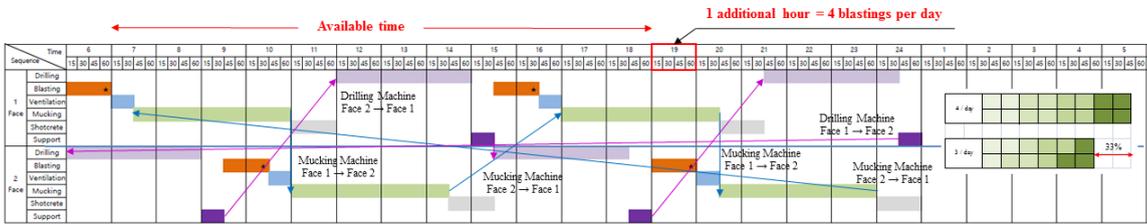


Fig. 7. Cycle time of a 6x6 m room-and-pillar underground structure (2 faces operated)

굴진면이 존재할 경우 1개의 굴진면 버력처리가 완료된 이후에 동일 장비가 다른 굴진면으로 이동하여 버력처리를 수행하는 것으로 검토하였으며 이때 버력처리는 전체 공정에 걸쳐 원활하게 배출되는 조건으로 가정하였다. 대표적으로 굴진면 1개 운영할 때와 2개 운영할 때의 공정표를 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다.

굴진면을 1개만 운용할 경우, 발파 허용시간이 12시간일 때 1일 2발파가 가능하나 천공장비 및 버력처리 장비가 약 6시간 동안 정지되므로 효율성이 떨어진다. 반면, 굴진면을 2개 운용할 경우에는, 발파 허용시간이 12시간일 때 1일 3발파가 가능하나 2번째 굴진면에서 19시 이후의 발파작업이 모두 익일 오전에 이루어져야 하므로 2번째 굴진면의 작업 효율이 낮아진다. 만약 발파 허용시간으로 13시간을 확보할 수 있다면 1일 4발파가 가능하여 장비 활용도가 높아져서 1일 3발파일 때 보다 굴착효율이 약 33% 향상된다(Fig. 7 참조). 따라서 굴진면 2개 운영 시에는 발파 허용시간에 대한 협의가 반드시 필요할 것으로 판단된다.

3개소의 굴진면을 운영할 경우에는 발파 허용시간이 12시간이어도 1일 4발파 수행이 가능하며 3일단위로 사이클 타임이 반복된다. 또한 각각 1대의 천공장비와 버력처리 장비로도 효율적인 시공이 가능할 것으로 판단된다. 공사기간이 여의치 않은 경우, 버력처리

장비를 추가 투입하면 약 50% 굴착효율이 증가하나 장비운용에 대한 비용이 추가적으로 발생하기 때문에 현장상황을 고려한 판단이 필요하다. 4개소의 굴진면을 운영할 경우에도 발파 허용시간을 12시간으로 적용해도 1일 4발파가 가능한 공정으로 분석되었다. 천공장비와 버력처리 장비를 하루에 4회 작업에 적용할 수 있어 효율성이 상대적으로 높다. 만약 발파 허용시간을 13시간 확보할 수 있고 버력처리 장비 1대를 추가적으로 투입할 경우, 1일 8발파까지 가능하여 굴착효율을 100% 증가시킬 수 있다.

굴진면을 5개소 이상 운영할 때는 앞서 고려한 1~4개소의 굴진면 운영 공정표의 조합으로 운영이 가능하다. 예를 들어 5개소의 굴진면을 운영할 경우, 굴진면이 2개소인 경우와 굴진면이 3개소인 경우의 조합으로 운영이 가능하다. 이러한 공정관계를 Table 11에 나타냈다. 단, 천공장비의 운영 상황에 따라 공정 조합이 달라지는 것만 다르며, 2개소의 굴진면 운영 시 발파 허용시간에 따라 발파 운영이 달라지기 때문에 이를 함께 표시하였다.

Table 11에 제시된 시공장비의 운영 대수와 굴진면 운영 개소수를 비교하면 최소로 운영이 되어야 할 장비 대수와 최대 장비 대수를 예상할 수 있다. 굴진면의 개소수는 계획부지의 면적에 따라 다르게 나타나

Table 11. Required number of equipments depending on the number of operating faces (Cross section: 6×6 m)

Number of faces in operation		Number of equipments	Necessity for additional blasting time
	1	1 SET	-
	2	1 SET	○
	3	1 SET	-
4	4	1 SET	-
	2 + 2	2 SET	○
5	2 + 3	2 SET	○
6	4 + 2	2 SET	○
	3 + 3	2 SET	-
	2 + 2 + 2	3 SET	○
7	4 + 3	2 SET	-
	2 + 2 + 3	3 SET	○
8	4 + 4	2 SET	-
	3 + 3 + 2	3 SET	○
	2 + 2 + 2 + 2	4 SET	○
9	3 + 3 + 3	3 SET	-
	4 + 3 + 2	3 SET	○
10	2 + 2 + 2 + 3	4 SET	○
	4 + 4 + 2	3 SET	○
	2 + 3 + 2 + 3	4 SET	○
	2 + 2 + 2 + 2 + 2	5 SET	○
11	4 + 4 + 3	3 SET	-
	3 + 3 + 3 + 2	4 SET	○
	2 + 2 + 4 + 3	4 SET	○
	2 + 2 + 2 + 2 + 3	5 SET	○
12	4 + 4 + 4	3 SET	-
	3 + 3 + 3 + 3	4 SET	-
	4 + 2 + 3 + 3	4 SET	○
	4 + 4 + 2 + 2	4 SET	○
	2 + 2 + 2 + 3 + 3	5 SET	○
	2 + 2 + 2 + 2 + 2 + 2	6 SET	○

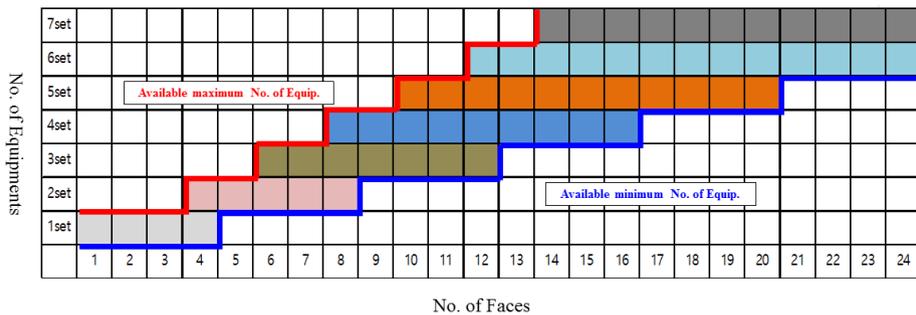


Fig. 8. Maximum and minimum number of equipments dependent on the number of faces (Cross section: 6×6 m)

며 굴진면의 운영 개수가 증가할수록 장비의 대수도 그에 따라 적정하게 추가 운영하는 것이 시공효율 측면에서 적합하다고 볼 수 있다.

이상과 같이 본 연구에서 고려한 검토조건들을 토대로 Fig. 8과 같은 주방식 지하구조물의 굴진면 운영 개소수에 따른 장비조합 범위를 제시하였다. 여기서 굴진면 운용 개소수에 따른 장비조합은 최대 장비 대수와 최소 장비 대수의 범위로 제시하였으며, 최소 장비 대수와 최대 대수를 각각 (굴진면 운영 개소수) ÷ 4(올림) 및 (굴진면 운용 개소수) ÷ 2(버림)로 정의하였다.

Fig. 8의 분석결과에 따르면 굴진면의 운용 수가 1~4개소일 경우에는 1개 조합(천공장비+버력처리 장비)의 장비를 운영하는 것이 적합하며, 굴진면의 운용 수가 5~8개소일 경우에는 2개 조합의 장비를 운영하는 것이 적합한 것으로 나타났다. 만약 공사기간이 부족할 경우에는 장비조합수를 최대 장비조합수까지 추가하여 굴착효율을 증가시키는 것이 적합하다. 그러나 최대 장비조합수로 공정계획을 수립하는 것은 공사기간 단축에는 효과가 있으나 공정계획이 복잡해지고 비경제적일 수 있으므로 현장 상황에 맞는 최적의 장비조합수를 검토하는 것이 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 주방식 공법에 의한 지하구조물의 굴착공정 설계를 위해 계획부지 면적과 발파굴착 및 시공장비 운용에 따른 굴착 시공사이클을 검토하였으며 다음과 같은 주요 결론들을 도출하였다.

1. 기존의 병렬 도로터널 시공사례를 검토하여 분석된 1회 사이클 타임은 착암공정, 버력처리 공정, 슛크리트 공정 및 록볼트 공정으로 구성되며 총 9.5시간으로 나타났다. 이를 바탕으로 본 연구에서 고려한 주방식 지하구조물의 단면 조건별로 천공 시간들을 도출하였다.

2. 주방식 지하구조물의 건설 시에 굴진면을 1개소만 운용하게 되면 착암, 버력처리, 슛크리트 등의 공정이 순차적으로 이루어져야 하기 때문에 시공장비의 사용 효율이 상대적으로 낮으며 하루에 최대 2회 발파만 가능한 것으로 나타났다. 반면, 굴진면을 2개소 운용하고 발파 허용시간을 1일 12시간에서 1시간 추가된 13시간으로 가정할 경우, 하루에 4회의 발파가 가능하여 장비사용 효율과 굴착시공 효율을 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다. 3개소의 굴진면을 운용하면 1일 12시간의 발파 허용시간 조건에서도 하루에 4발파가 가능하지만 3일 단위로 시공사이클이 반복되므로 공정이 복잡해진다. 굴진면을 4개소 운용할 경우에는 1개의 장비조합으로 하루에 4회 발파가 가능하지만, 2개의 장비조합을 운영하면 하루에 8회 발파가 가능한 것으로 산출되었다.

3. 굴진면을 2~4개소 운용하는 것으로 기준으로 하여, 본 연구에서는 향후 주방식 지하구조물의 공정 검토 시 활용이 가능하도록 굴진면의 운용 개소수에 따라 필요한 장비조합의 범위를 도표화하여 제시하였다. 본 연구에서 고려하는 주방식 지하구조의 경우, 굴진면의 운용 수가 1~4개소일 경우에는 1개 조합(천공장비+버력처리 장비)의 장비를 운영하는 것이 적합하며, 굴진면의 운용 수가 5~8개소일 경우에는 2개 조합의 장비를 운영하는 것이 적합한 것으로 나타났다.

4. 이상과 같이 본 연구에서 제시한 도표를 사용하여 굴진면 운용 개소수에 따라 최소 및 최대로 필요한 장비조합수를 계획하는 것이 가능하다. 공사기간이 부족할 경우에는 장비조합수를 최대 장비조합수까지 추가하여 굴착효율을 증가시킬 수 있다. 그러나 최대 장비조합수로 공정계획을 수립하게 되면 공사기간 단축에는 효과가 있으나 공정계획이 복잡해지고 공사비용이 증가될 수 있으므로 현장 상황에 맞는 최적의 장비조합수를 검토하는 것이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업인 “운용 중 공간확장이 가능한 지하 굴착 및 안정화 기술 개발”의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. Carmody, J., Sterling, R. (1993), *Underground Space Design - A Guide to Subsurface Utilization and Design for People in Underground Spaces*, International Thomson Publishing company, p. 110.
2. Chun, J., So, B., Choo, J, Woo, S. (2005), “Simulation based Productivity Analysis for NATM Operations”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 25, Issue 3D, pp. 457-462 (in Korean).
3. Darling, P. (2011), *Mining Engineering handbook*, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, INC.(SME), 3rd Edition.
4. Esterhuizen, G.S., Dolinar, D.R., Ellenberger, J.L, Prosser, L.J. (2011), *Pillar and roof span design guidelines for underground stone mines*, Department Of Health And Human Services, NIOSH, IC 9526.
5. Hartman, H.L., Mutmansky, J.M. (2002). *Introductory Mining Engineering*. 2nd edition, Wiley, New Jersey.
6. Hoek, E., Brown E.T (1980), *Underground Excavation in Rock*, Institution of Mining and metallurgy.
7. KEC (2000), *Construction management for drill-and-blasting method in tunnel*, Korea Express Corporation (in Korean).
8. Lee, C., Hwang, J., Kim, E., Chang, S.-H. (2014a), “Consideration on design procedure of room-and-pillar underground structure, Part I: parametric study”, *J. of Korean Tunn Undergr Sp Assoc*, Vol. 16, No. 5, pp. 487-495 (in Korean).
9. Lee, C., Hur, J., Hyun, Y., Chang, S.-H. (2014b), “Consideration on design procedure of room-and-pillar underground structure, Part II: selection of shape to design supports”, *J. of Korean Tunn Undergr Sp Assoc*, Vol. 16, No. 5, pp. 497-506 (in Korean).
10. Lee, C., Hyun, Y., Song, J., Chang, S.-H. (2015), “A preliminary study on the excavation sequence of a room-and-pillar underground structure by the drill-and-blast method”, *J. of Korean Tunn Undergr Sp Assoc*, Vol. 17, No. 6, pp. 605-614.
11. MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport Ordinary) (2011), *Standard Estimating System of Construction* (in Korean).
12. Svanholm, B.O., Persson, P.A., Larsson, B. (1977), “Smooth blasting for reliable underground openings”, *In Rockstore 77: Storage in excavated rock caverns*, proc. 1st Int. Symp., Stockholm, (ed. M. Bergman), pp. 573-579. Oxford: Pergamon.