

발파 굴착에 의한 주방식 지하구조물의 굴착공기 분석 연구

이철호¹ · 현영환² · 송준호³ · 장수호^{4*}

¹정회원, 한국건설기술연구원 지반연구소 전임연구원

²정회원, ㈜에스코컨설턴트 차장

³정회원, ㈜에스코컨설턴트 과장

⁴정회원, 한국건설기술연구원 지반연구소 연구위원

A preliminary study on the excavation sequence of a room-and-pillar underground structure by the drill-and-blast method

Chulho Lee¹, Younghwan Hyun², Junho Song³, Soo-Ho Chang^{4*}

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

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

³ESCO Consultant & Engineers Co., Ltd, Director

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

ABSTRACT: A room-and-pillar underground structure is characterized by its grid-type array of room and pillar. As a result, its construction and economical efficiency can be governed by excavation sequence. In this study, the construction period by the drill and blast method which can be treated as a main sequence for excavation was examined by considering the regulation for blasting and construction standard of estimation in Korea. To evaluate the construction period for the room-and-pillar underground structure constructed in 4 kinds of square-type area (30×30~57×57 m), the concurrent excavation pattern which was suggested in the previous researches was used. From the suggested condition, the total construction period by drill-and-blast method can be estimated with the consideration of the construction area, number of jumbo drill and faces in operation.

Keywords: Room-and-pillar underground structure, Drill and blasting, Excavation, Construction period

초 록: 주방식 지하구조물은 여러 개의 암주의 룸으로 구성된 격자 형태의 구조물로 굴착순서에 따라 주방식 지하구조물의 시공성과 경제성이 좌우될 수 있다. 본 연구에서는 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 순차시공방식으로 검토하였다. 주방식 지하구조의 계획부지 크기에 따라 굴착공기와 장비운영 등을 고려하여 전체 굴착공정을 예상할 수 있었으며 막장운영 계획에 따라 운영가능한 장비수를 고려하여 전체 굴착공기를 예상할 수 있었다.

주요어: 주방식 지하구조물, 발파굴착, 굴착, 굴착공기

1. 서론

주방식 공법(Room-and-pillar method)은 수평 또는 거의 수평으로 매장되어 있는 광물을 효율적으로 채

광할 수 있는 굴착공법으로 여러 굴착면에서 동시에 채광이 진행되기 때문에 생산성과 효율성이 높은 공법으로 알려져 있다(Hartman and Mutmansky, 2002; Darling, 2011). 그러나 지하공간 건설을 위해 주방식 공법을 적용하기 위해서는 기존 자원개발에서의 주방식 채광과는 다르게 공간 확보 측면에서의 중장기적인 공간 구조물의 안정성 확보에 더욱 주안점을 두어

*Corresponding author: Soo-Ho Chang
E-mail: sooho@kict.re.kr

Received October 16; Revised October 28;
Accepted October 30

천장부와 암주부가 연계된 하나의 통합 구조물로써 설계가 이루어져야 한다는 것이 차이점이라고 할 수 있다(Lee et al., 2014a).

지하구조물의 형태가 동일한 시설물이라고 하더라도 모든 부분을 동일하게 설계하고 공사를 수행하지는 않는다. 즉, 지하구조물 시공에 있어서 건설하려는 대상 지반의 조건이 현장마다 다르고 같은 현장이라고 하더라도 심도나 방향에 따라 지반조건이 동일하지 않은 특성을 가지고 있으며, 공사 과정에서 지반조사 때에는 나타나지 않은 많은 변수들의 발생 가능성을 가지고 있기 때문에 공정을 계획함에 있어 충분한 사전조사와 체계적인 계획 수립 그리고 이를 통한 공정의 효율성을 필요로 한다.

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. 특히, 컨티뉴어스마이너를 적용함으로써 굴착진동을 최소화하고 장비 이동거리를 최소화 하며, 1개 룸을 굴착한 이후에 인접한 룸들을 굴착하는 개념이다. 그러나 우리나라에서는 도심지 지하공간 건설시 암반의 경우 연암이 일정하게 나타나지 않고 연암, 경암, 파쇄대 등이 반복적으로 나타나며 암반의 강도차이가 크며 기계굴착을 적용하기에는 강도 또한

커서 기계굴착보다는 발파굴착을 주로 실시하고 있다. 따라서 본 연구에서는 주방식 굴착공정의 최적 설계를 위하여 발파공법을 가정한 계획공정에 따른 안정성을 검토하였다. 기존 연구(Lee et al., 2014)에서는 가로·세로 병행시공 조건 및 가로·세로 순차시공의 2가지 조건에 대해 주방식 굴착공정을 검토하고, 그에 따른 지하구조물의 안정성을 검토한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 이상과 같은 기존 연구에서 상대적으로 시공효율이 높은 것으로 나타난 가로·세로 병행시공 방식으로 발파공정을 검토하였다.

일반적인 NATM의 주요 굴착 공정은 천공·발파, 버력처리, 슛크리트, 록볼트 설치 등(Chun et al., 2006)으로 구분되나 주방식 지하구조물의 굴착에 소요되는 모든 요소들을 고려하여 공정을 도출하기가 어렵기 때문에, 본 연구에서는 발파 공정 가운데 발파 허용시간, 발파 사이클 타임 및 계획부지의 규모에 따른 굴착장비 운용시간을 대상으로 하여 주방식 공법의 굴착공정을 검토하였다.

2. 주방식 지하구조물의 굴착공정 검토

2.1 발파 허용 시간

우리나라에서 발파 굴착시공은 총포·도검·화약류

Table 1. Day and night time of 2012

| Month | Day time | | Night time | | Sunrise-Sunset | |
|---------|----------|-----|------------|-----|----------------|-----|
| | hr | min | hr | min | hr | min |
| 1 | 7 | 44 | 17 | 38 | 9 | 54 |
| 2 | 7 | 22 | 18 | 10 | 10 | 48 |
| 3 | 6 | 42 | 18 | 40 | 11 | 58 |
| 4 | 5 | 57 | 19 | 8 | 13 | 11 |
| 5 | 5 | 23 | 19 | 35 | 14 | 12 |
| 6 | 5 | 11 | 19 | 54 | 14 | 43 |
| 7 | 5 | 24 | 19 | 51 | 14 | 27 |
| 8 | 5 | 49 | 19 | 23 | 13 | 34 |
| 9 | 6 | 14 | 18 | 39 | 12 | 25 |
| 10 | 6 | 41 | 17 | 54 | 11 | 13 |
| 11 | 7 | 12 | 17 | 22 | 10 | 10 |
| 12 | 7 | 39 | 17 | 16 | 9 | 37 |
| Average | 6 | 27 | 18 | 38 | 12 | 11 |

등의 단속법과 관련이 있어서 화약의 취급과 관련해서는 법적인 규제를 받고 있다(법률 제 10219호). 따라서 굴착공사 중에 발파를 위해서는 관할구역의 경찰서장이 발급하는 화약류 사용허가를 취득하여야 하며, 경찰서장은 화약류 사용 목적·장소·일시·수량 또는 방법을 지정하여 허가하게 된다. 그런데 발파가 허용되는 시간은 법률에 구체적으로 명시되어 있지 않아 경찰서장의 재량으로 발파 시간이 제한되는데 일반적으로 주간에만 사용이 허가되고 야간에는 그 사용을 제한하게 된다. 또한 발파 허용 시간은 하절기와 동절기에 다르게 적용되며, 기본적으로 일출 후부터 일몰 전까지 발파가 허가된다.

우리나라의 일출 및 일몰시간 중 서울 지역의 일출 및 일몰시간은 Table 1과 같이 나타나며, 2012년의 경우에는 동지가 포함된 12월에 일출부터 일몰까지의 시간이 9시간 37분으로 가장 짧았으며, 하지가 포함된 6월에는 14시간 43분으로 가장 길었다. 연 평균 일출에서 일몰까지 시간은 12시간 11분으로 나타나 평균

적으로 대략 1일 12시간 발파가 가능할 것으로 판단된다.

2.2 발파굴착 사이클 타임 분석

지하공간에 대한 굴착공사는 크게 굴착, 버력처리, 지보재 설치 등의 공정으로 구분되며, 또한 각 공정별 적용시간은 굴착방법(발파 또는 기계굴착)과 지하공간의 단면적에 따라 달리 적용된다. 본 연구에서는 국토교통부 표준품셈에 제시된 ‘터널 굴착에 따른 사이클 타임’을 분석하여 주방식 지하구조에 가장 적용하였다.

국토교통부 건설공사 표준품셈(2011)에 따르면 터널 굴착 방법에 따른 1발파당 사이클 타임을 다음의 Table 2와 같이 규정하고 있다. 굴착에서는 천공준비, 측량 및 마킹, 천공, 장약 및 발파, 환기의 5가지 작업으로 구분되나, 본 연구에서는 굴착장비(점보드릴)의 운용과 관계있는 천공준비에서 천공까지의 작업시간

Table 2. Cycle time of tunnel excavation by the drill-and-blast method (MOLIT, 2011)

| Cycle | | Drill-and-blast | | | Mechanical excavation | | | Note |
|----------------------|------------------------|-----------------|---------|---------|-----------------------|---------|---------|----------|
| | | Group A | Group B | Group C | Group A | Group B | Group C | |
| Drilling | Preparation | 10~15 | 15~20 | (15~20) | 10~15 | 15~20 | (15~20) | |
| | Survey and marking | 5~10 | 10~15 | 15~20 | 5~15 | 10~20 | 15~20 | |
| | Drill | T1 | T1 | T1 | T1 | T1 | T1 | |
| | Charge and blast | 30~40 | 40~50 | 50~60 | - | - | - | |
| | Ventilation | 15~20 | 20~25 | 25~30 | - | - | - | |
| Mucking | Preparation | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | |
| | Mucking | T2 | T2 | T2 | T2 | T2 | T2 | |
| | Muck transport | 3~5 | 3~5 | - | 3~5 | 3~5 | - | |
| | Scaling | 20~30 | 30~40 | 40~50 | 20~30 | 30~40 | 40~50 | |
| Shotcrete | Preparation | 10 | 10 | (10) | 10 | 10 | (10) | |
| | Cleaning | T3 | T3 | T3 | T3 | T3 | T3 | |
| | Support installation | 25~30 | 30~35 | 40~45 | 25~30 | 30~35 | 40~45 | |
| | Wire mesh installation | T4 | T4 | T4 | T4 | T4 | T4 | |
| | Shotcrete spraying | T5 | T5 | T5 | T5 | T5 | T5 | |
| | Disposal of rebounds | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | |
| Rock bolt | Equipment check | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | |
| | Preparation | 10 | 10 | (10) | 10 | 10 | (10) | |
| | Drilling | T6 | T6 | T6 | T6 | T6 | T6 | min/hole |
| | Drillhole cleaning | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | min/hole |
| | Packing | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | min/hole |
| | Installation | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | min/hole |
| Transport and others | | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | |

을 분석에 고려하였다. 굴착단면적에 따른 구분인 A군(Group A)은 기계굴착 시 소형브레이커 사용이 가능한 소규모 터널이나 발파굴착시 착암기로 천공할 수 있는 소규모 터널로 규정하고 있으며, B군(Group B)은 기계굴착시 대형브레이커의 사용이 가능한 단선급 터널이거나 발파굴착시 점보드릴로 천공은 가능하나 덤프트럭과 로더의 작업이 원활하지 못하고 장비의 교행이 불가능한 규모의 단선급 터널로 규정하고 있다. C군(Group C)은 기계굴착시 대형브레이커의 사용이 가능한 복선급 터널 또는 2차로 이상의 터널이거나 발파굴착시 점보드릴로 천공이 가능하며 차량 교행은 물론 덤프트럭과 로더의 작업이 원활하고 장비의 교행이 가능한 복선급 터널 또는 2차로 이상의 터널로 규정하고 있다. 이 가운데 대표적으로 A군과 B군에 대해 본 연구에서 고려하는 주방식 지하구조물의 규모를 Table 3에 나타내었으며, 본 연구에서 고려하는 주방식 지하구조는 B군에 해당하는 단선급 터널(single-line tunnel) 규모로 규정할 수 있다.

굴착 단면적에 따른 장비조합은 B군일 경우 점보드릴(2 booms), 로더 및 덤프트럭으로 구성된다. 천공장비의 천공속도는 암종별로 구분되는데 본 연구에서는 B군 또는 C군 터널에 적용되는 1회 굴진장 3.0 m의 경암 조건으로 가정하였다.

주방식 지하구조물에 대한 최적 굴착공정의 사이클 타임을 검토할 때, 천공준비, 측량 및 마킹, 장약 및 발파 시간은 앞서 설명한 건설공사 표준품셈의 시간을 평균하여 적용하였으며 천공시간은 다음의 식 (1)에 의해 산정하였다(Table 4 참조).

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

총 천공장은 천공수와 천공장의 곱으로 산정할 수 있으며 발파효율을 고려하여 10%를 증가 하여 3.3 m를 적용하였다. 천공속도는 건설공사 표준품셈의

Table 3. Comparison of the Group A, Group B and room-and-pillar underground structures

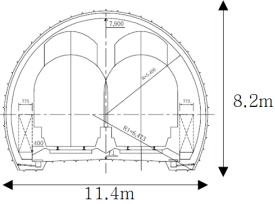
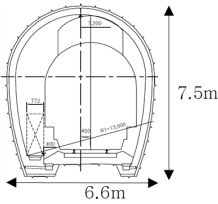
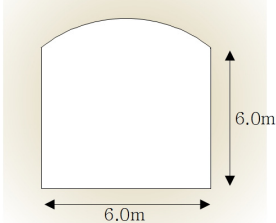
| Double track tunnel | | Single line tunnel | Room-and-Pillar underground structure |
|---|---------------------|---|--|
|  | |  |  |
| Width | 11.4 m | 6.6 m | 6.0 m |
| Height | 8.2 m | 7.5 m | 6.0 m |
| Area | 83.4 m ² | 46.5 m ² | 38.0 m ² |
| Group | C | B | B |

Table 4. Cycle time of a room-and-pillar underground structure

| Process | Standard of Estimate (B) | Room-and-Pillar | Note |
|--------------------------|--------------------------|-----------------|---------------|
| Preparation (min) | 10~20 | 15 | Average value |
| Survey and Marking (min) | 10~15 | 17 | Average value |
| Drilling (min) | T1 | | Eq. (1) |

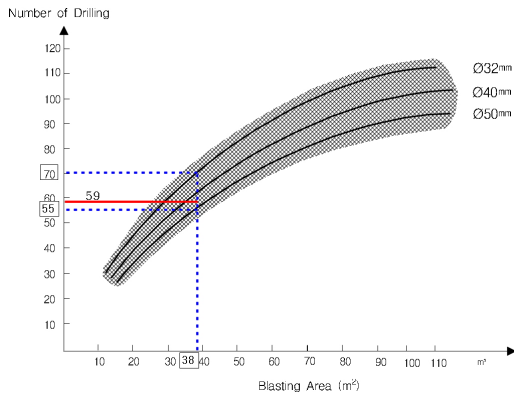


Fig. 1. Number of drilling depending on area of excavation (Korea Express Corporation, 2000)

경암 조건에서의 천공기계 평균값인 97.5 cm/min을 적용하였고 천공장비 붐대수는 점보드릴(2 booms)을 적용하였다. 단, 총 천공장의 경우, 주방식 지하구조물에 대한 실제 시공 사례가 부족하기 때문에 굴착단면적의 적정 천공수는 추가 검토가 필요하다.

터널발파의 경우 경험적·실험적으로 도출된 다양한 굴착방식이 사용될 수 있으나, 터널발파는 일반적인 계단발파와 비교할 때 장약량 산출 시 여러 가지 변수요인들로 인하여 장약량 계산방식이 계단발파에 비하여 정량적이지 못하고 체계적이지 못한 특성을 가지고 있다. 한국도로공사에서는 제시한 「터널 발파 작업 시공관리(2000)」를 통해 발파이론, 실험 및 경험에 근거하여 정상적인 발파조건을 기준으로 하여 다음의 Fig. 1과 같이 발파면적에 따른 천공수를 제안한 바 있다.

따라서 본 연구에서 고려하는 주방식 지하구조물의 굴착단면은 38 m²이므로, Fig. 1에 따르면 천공수는 천공경에 따라 다소 차이는 있지만 대략 55공~70공

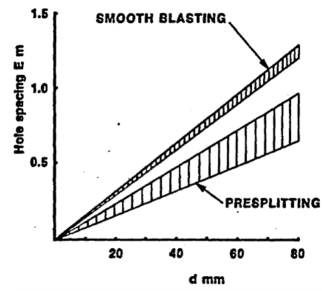


Fig. 2. Recommended ranges of hole spacing as a function of hole diameter for smooth blasting and presplitting (Svanholm et al., 1977)

사이로 분석되며 일반적인 점보드릴의 천공경인 Ø45 mm를 고려하면 약 59공이 소요될 것으로 판단된다. 단, 여기에는 스무드 블라스팅(smooth blasting)을 위한 추가적인 천공수는 고려되지 않았다.

Svanholm et al. (1977)은 스무드 블라스팅에 대한 천공간격을 Fig. 2와 같이 제안한 바 있다. 따라서 Fig. 2로부터 본 연구에서 고려하는 점보드릴 천공경인 45 mm를 적용할 경우 스무드 블라스팅의 천공간격은 약 0.65 m로 추정된다. 또한 Hoek and Brown (1980)은 스무드 블라스팅에 대한 천공간격을 다음의 Table 5와 같이 제안한 바 있다. 여기에서도 점보드릴 천공경이 45 mm일 경우, 스무드 블라스팅의 천공간격을 0.5~0.7 m로 추천하고 있다. 이상과 같은 기존 자료에 근거하여, 본 연구에서는 스무드 블라스팅의 천공간격을 0.65 m로 적용하였다. 그 결과 주방식 지하구조물의 단면 형상과 크기를 고려할 때 스무드 블라스팅을 위한 최외곽공의 개수는 36공으로 산출되었다. 따라서 터널 발파작업 시공관리(Korea Express Corporation, 2000)에 제시된 굴착단면적에 따른 천공수(59공)와 스무드 블라스팅의 천공수(36공)를 고려

Table 5. Some recommendations for smooth blasting(Hoek and Brown, 1980)

| Drill Hole Dia. (mm) | Charge Dia. (mm) | Charge Concentration (kg ANFO/m) | Burden (m) | Spacing (m) |
|----------------------|------------------|----------------------------------|------------|-------------|
| 25-32 | 11 | 0.08 | 0.30-0.45 | 0.25-0.35 |
| 25-48 | 17 | 0.20 | 0.70-0.90 | 0.50-0.70 |
| 51-64 | 22 | 0.44 | 1.00-1.10 | 0.08-0.90 |

하면, 본 연구에서 고려한 주방식 지하구조물의 굴착 단면적에 적절한 천공수는 총 95공이 된다.

이상과 같이 산출된 천공수를 고려할 때, 건설공사 표준품셈에서 제시한 평균 천공준비 시간, 측량·마킹 시간 및 식 (1)로 계산된 천공시간은 총 192.8분으로서 대략 3.2시간으로 산정된다. 따라서 1일 발파시간 12시간을 고려하면 굴착장비의 1일 막장 작업개소는 약 3.75개로 운영이 가능할 것으로 판단된다. 즉, 굴착장비 1대로 1일에 최대 작업가능한 막장수가 3.75개이기 때문에, 굴착장비 운전자의 휴식시간과 막장 간 이동시간을 고려하면 장비 1대당 대략 하루 3막장 굴착이 가능할 것으로 판단된다.

3. 주방식 지하구조물의 계획부지 규모에 따른 공정 검토

지하 굴착공사 중에 운영되는 막장 개수, 장비, 인력 등의 문제는 공사비와 직접 관련이 있으며 공사기간에도 영향을 미칠 수 있으므로, 규모에 따라 굴착장비의 개수와 굴착공기를 고려해야 한다. 본 연구에서는 기존 연구(Lee et al., 2014)에서 제시한 주방식 지하구조물의 가로·세로 병행시공 방법을 고려하였으며, 발파 이격거리는 굴진장의 3배로 적용하였다. 앞선 2.2절에서 굴착장비 1대로 작업이 가능한 적정 막장수는 3막장으로 산정되었고, 3막장 이상을 운영해야 하면 굴착장비 1대를 추가로 적용하는 것으로 가정하였다. 즉, 굴착장비 1대로 1일 3막장을 굴착하는 것을 기준으로 하여 개략적인 주방식 지하구조물의 굴착공기를 검토하였으며 막장운영 개소가 1막장일 경우에는 버력처리와 지보재 설치를 고려하여 1일 2회 발파하는 것으로 가정하였다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 버력처리 등의 시간을 고려하지 않은 순수 굴착과 관련된 굴착공기로 실제 현장 조건과는 다를 수 있다.

Fig. 3은 굴착공기를 계산하기 위한 주방식 지하구조물의 개략도이다. 가로·세로 병행시공이 이루어지는 주방식 지하구조로서 암주(rock pillar)간 거리와

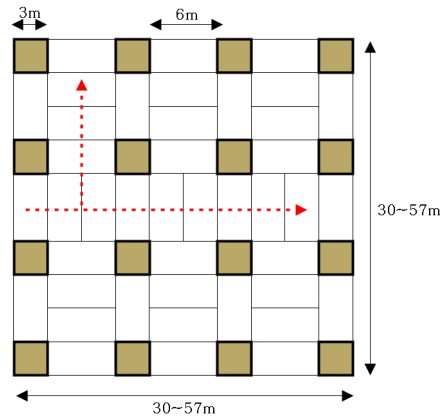


Fig. 3. Schematics for estimating excavation time of room-and-pillar underground structure

암주 너비는 각각 6 m 및 3 m이다. 또한 주방식 지하구조물의 계획부지의 면적을 30×30 m~57×57 m로 고려하였다. 이러한 주방식 지하구조물의 계획부지의 규모에 따라 암주의 개수는 16개~49개로 구성된다. 총 발파 횟수는 굴진방향의 암주 개수(n)에 따라 다음의 식 (2)와 같이 산정되며, 이를 통한 총 발파 횟수는 주방식 지하구조물의 규모에 따라 42~156회로 산정된다.

30×30 m 규모의 계획부지 규모에서 1회 3 m 굴진을 가정하였을 때 가능한 굴착공정의 예를 Fig. 4에 나타내었다. 이 경우 총 42회 발파로 굴착이 완료되며, 운영되는 막장수와 굴착공기의 관계는 Fig. 5와 같다. 이와 같은 30×30 m 계획부지 규모에서는 막장의 운영수가 1~2막장으로 분석되어 굴착장비 1대로 작업이 가능할 것으로 판단되었다. 또한 막장 운영수가 1개인 구간에는 1일 2발파를 적용하고 막장 운영수가 2개인 구간은 1일 3발파를 적용하면, 굴착장비 1대만 운영했을 때 30×30 m 주방식 지하구조의 굴착공기가 대략 16일로 산정된다.

이러한 순차적인 굴착공정 분석을 통해 지하구조물의 계획부지 면적이 39×39 m, 48×48 m 및 57×57 m 계획부지에 대해서도 굴착공기를 산정해 보면 각각 Fig. 6~Fig. 8과 같다. 계획부지의 면적이 39×39 m인

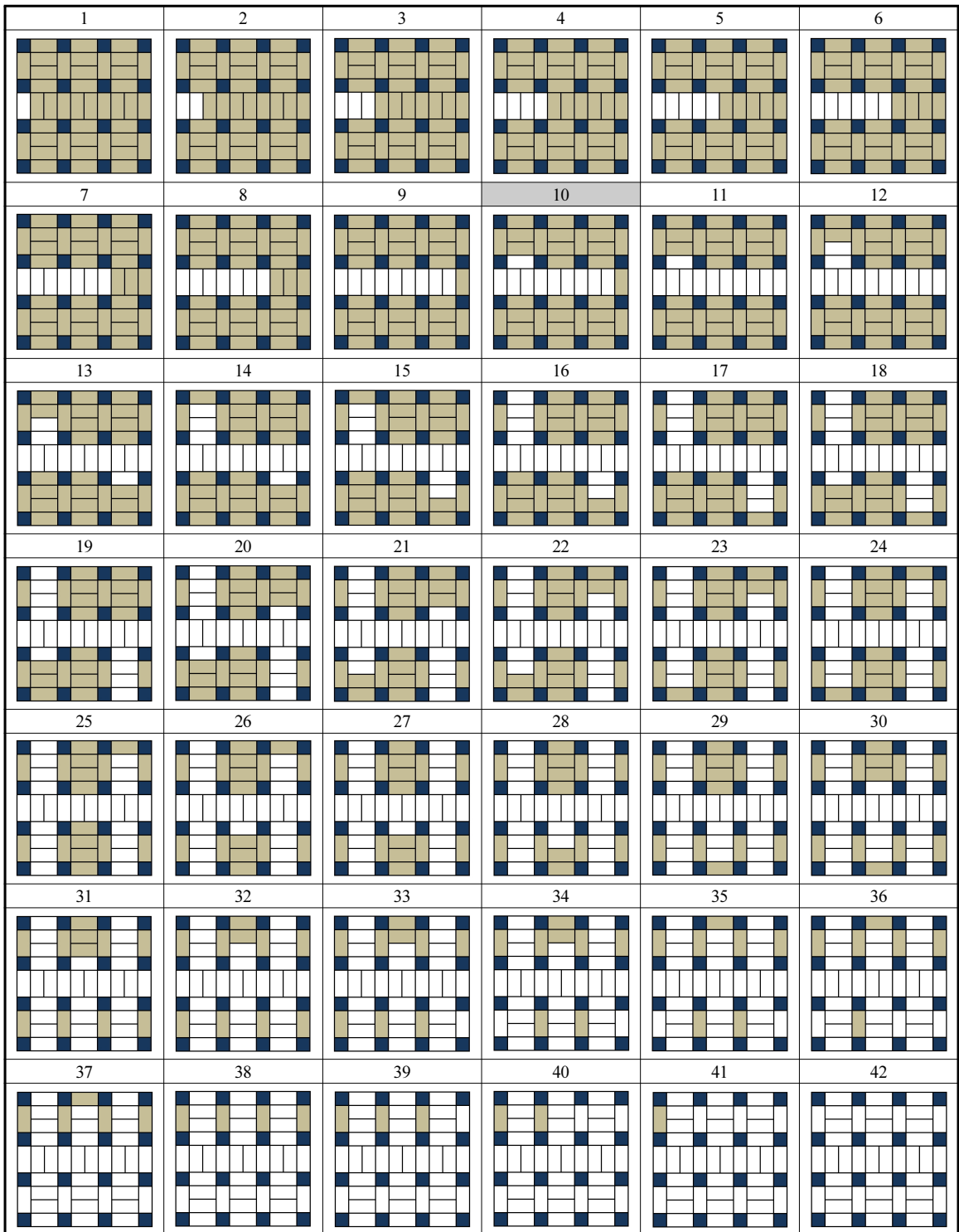


Fig. 4. Excavation sequence of an underground room-and-pillar structure (30×30 m)

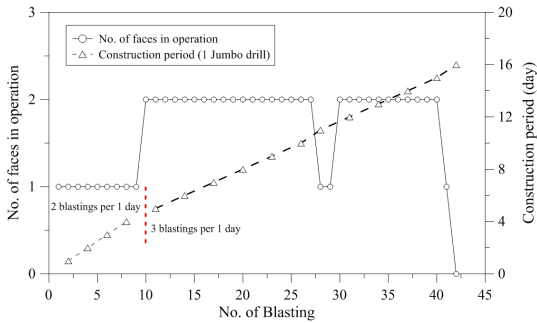


Fig. 5. Construction period by the number of blasting and faces in operation (30×30 m)

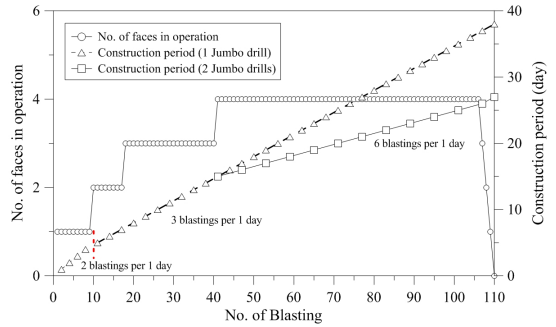


Fig. 7. Construction period by number of blasting and faces in operation (48×48 m)

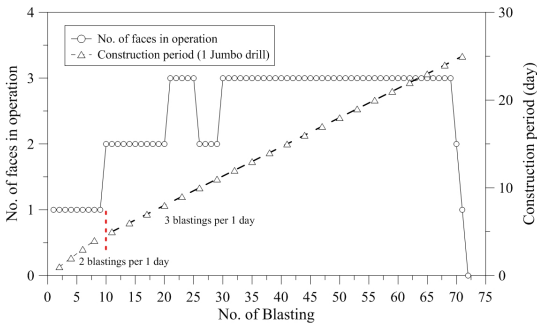


Fig. 6. Construction period by number of blasting and faces in operation (39×39 m)

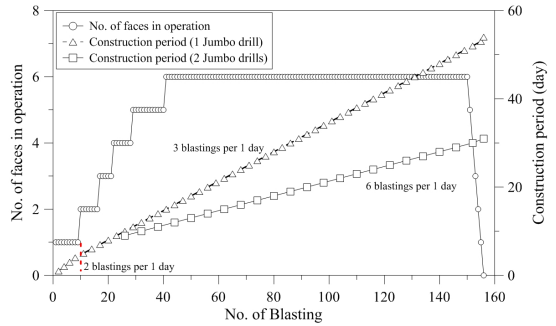


Fig. 8. Construction period by number of blasting and faces in operation (48×48 m)

경우에는 총 72회의 발파로 굴착이 완료되며, 막장 운영수는 1~3개 막장으로 분석되어 굴착장비 1대로 작업이 가능할 것으로 나타났다. 또한 막장 운영수가 1개인 구간에는 1일 2발파를 적용하고, 막장운영수가 2개 이상인 구간은 1일 3발파를 적용하면 굴착장비 1대로 운영했을 때 대략 26일이 산정된다. 반면, 계획 부지 면적이 48×48 m인 경우에는 총 110회 발파가 이루어져야 하며 막장 운영수는 1~4개 막장으로 분석되었다. 그러나 41회 발파 시부터 4개 막장의 운영이 가능하므로 굴착장비 1대의 추가적인 운영을 검토할 수 있는 것으로 나타났다. 즉, 굴착장비 1대로 시공할 경우의 총 굴착공기는 대략 38일로 산정되나, 4개 막장이 운영되는 시점에서 굴착장비를 추가 투입하는 것으로 가정하면 굴착공기는 대략 27일로 산정되어 약 11일의 공기단축이 예상된다. 반면, 굴착장비 2대

를 적용하여 장비별 사용일수(굴착공기)를 분석하면, 추가 투입된 굴착장비들의 사용일수가 27일 및 12일로 나타나 초기 투입된 굴착장비에 비해 상대적으로 적용효율이 약 45% 낮은 것으로 산출되었다. 따라서 주방식 지하구조물의 굴착공기 최적화를 위해서는 2대의 굴착장비를 운영하는 것이 적절할 것으로 판단되나, 공기단축 기간이 11일로서 단축효과가 크지 않고 공사현장의 경제성을 고려하면 굴착장비 1대로 운영해도 무리가 없을 것으로 판단된다.

마지막으로 계획부지 면적이 57×57 m인 경우에는 총 156회 발파에 의해 굴착을 완료하는 것이 가능한 것으로 나타났다. 이때의 막장 운영수는 1~6개로 나타났으며 22번째 발파부터 4개의 막장 운영이 가능하므로 굴착장비 추가투입을 고려할 수 있다. 굴착장비 1대를 이용할 경우의 굴착공기는 약 54일이 소요되

는 것으로 나타났으며, 4개 막장이 운영되는 시점에서 굴착장비를 추가 투입할 경우의 굴착공기는 대략 31일로 산정되어 약 23일의 공기단축이 가능하다. 또한 굴착장비 2대를 적용할 경우에 대해 장비별 사용일수(굴착공기)를 분석하면, 각각 31일과 21일로서 추가 투입된 굴착장비의 사용일수가 초기 투입된 굴착장비에 비해 상대적으로 약 70% 적용효율을 보이므로 57×57 m 계획부지에 대해서는 굴착장비 2대를 사용하는 것이 효과적인 것으로 판단된다. 이상과 같이 분석된 주방식 지하구조물의 계획부지 면적에 따른 발파 횟수, 굴착공기 및 적용 가능한 굴착장비 대수를 정리하면 Table 6과 같다.

앞서 분석한 바와 같이, 계획 부지의 면적이 30×30 ~ 48×48 m인 경우에는 굴착장비 1대를 적용하는 것이 적정하며, 계획부지 면적이 57×57 m인 경우에는 굴착장비를 2대 사용하는 것이 효과적으로 나타났다. 이상의 경향으로부터, 보다 넓은 계획부지에 대한 검토를 위해 계획부지 면적에 따라 운영해야 할 굴착장비의 수를 추세선으로 분석하면 다음의 Fig. 9와 같다. 예를 들어, 계획부지의 면적이 66×66 m 일 경우에 운영해야할 굴착장비의 수는 2.95대로 나타나 약 3대를 적용해야 하는 것으로 나타나며, 계획부지의 크기가 75×75 m일 경우에는 운영해야할 굴착장비의 수는 4.3대로서 약 4대를 적용하는 것이 효과적인 것으로 분석되었다.

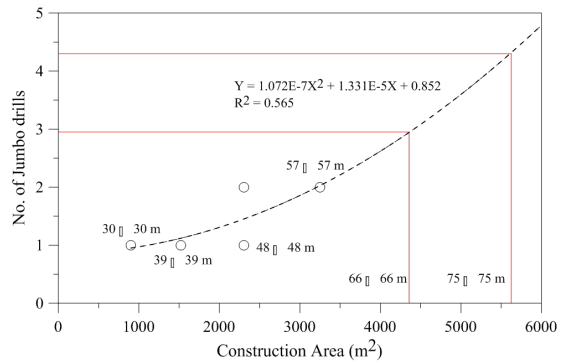


Fig. 9. Relationship between required equipments and construction area

4. 결론

본 연구에서는 주방식 공법이 적용된 지하구조물의 최적 굴착공정 설계를 위해 계획부지 면적 조건별로 발파굴착과 장비운용에 따른 굴착공기를 검토하였으며 다음과 같은 주요 결론들을 도출하였다.

1. 기존의 화약류 사용 허가 사례와 서울 지역의 일출-일몰 시간을 분석한 결과, 화약류 사용시간은 기본적으로 일출 후~일몰 전까지 가능하며 일출에서 일몰 사이의 연평균 시간은 12시간 11분으로 검토되어 1일 발파 가능시간을 12시간으로 적용하였다.
2. 발파굴착 사이클 타임을 분석하기 위해 주방식 지하구조물의 굴착단면적에 따른 천공수와 천공시간을 검토한 결과, 천공준비, 측량 및 마킹 시간을 고려하면 주방식 지하구조물에서 굴착장비(점

Table 6. Summary of construction period depending on construction size

| Size (Pillar) | Area (m ²) | No. of Blasting | Construction Period (day) | Equipment |
|---------------|------------------------|-----------------|--|-----------|
| 30×30 m (4×4) | 900 | 42 | 1 Jumbo drill : 16 | 1 |
| 39×39 m (5×5) | 1,521 | 72 | 1 Jumbo drill : 26 | 1 |
| 48×48 m (6×6) | 2,304 | 110 | 1 Jumbo drill : 38 2 Jumbo drill : 27 | 1 |
| 57×57 m (7×7) | 3,249 | 156 | 1 Jumbo drill : 54 2 Jumbo drill : 31 | 2 |
| 66×66 m (8×8) | 4,356 | 210 | | |
| 75×75 m (9×9) | 5,625 | 272 | | |

보드랄)의 1발파당 천공 사이클 타임은 약 3.2시간으로 산정되었다.

3. 1일 발파 허용시간 12시간 및 1발파당 천공 사이클 타임 3.2시간을 고려하면, 1일 동안 굴착장비 1대로 작업 가능한 적정 막장수는 발파굴착만을 고려할 때 1일 3막장으로 검토되었다.
4. 주방식 지하구조물의 계획부지 면적(30×30 m~57×57 m)에 따른 굴착공정을 검토한 결과, 계획부지 면적이 30×30 m~48×48 m일 때는 굴착장비 1대, 그리고 계획부지 면적이 57×57 m일 때는 굴착장비 2대가 적정할 것으로 나타났다. 이상의 결과들에 근거한 추세선을 분석한 결과, 계획부지 면적이 66×66 m 및 75×75 m인 경우에는 각각 3대 및 4대의 굴착장비를 적용하는 것이 효과적인 것으로 나타났다.
5. 본 연구의 공정검토는 가정된 4가지 조건의 계획부지 면적에 대해서 굴착장비의 적용 개수를 검토한 결과로서, 향후에는 굴착방법, 부지면적, 버력처리, 지보재 설치 등을 고려한 다양한 시공순서들을 고려하여 주방식 지하구조물의 안정성, 시공성, 경제성 등을 종합적으로 평가하여야 할 것이다.

감사의 글

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

References

1. 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).
2. Darling, P. (2011), Mining Engineering handbook, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, INC.(SME), 3rd Edition.
3. Hartman, H.L., Mutmansky, J.M. (2002), Introductory Mining Engineering. 2nd edition, Wiley, New Jersey.
4. Hoek, E., Brown, E.T. (1980), Underground Excavation in Rock, Institution of Mining and metallurgy.
5. Korea Express Corporation (2000), Construction management for drill-and-blasting method in tunnel (in Korean).
6. 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).
7. 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).
8. MLTO (Ministry of Land, Infrastructure and Transport Ordinary) (2011), *Standard Estimating System of Construction* (in Korean).
9. 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.