

주방식 지하구조물의 설계 방법 고찰 Part I: 매개변수 연구

이철호¹ · 황제돈² · 김은혜³ · 장수호^{4*}

¹정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 전임연구원

²정회원, 에스코컨설턴트, 사장

³정회원, 에스코컨설턴트, 대리

⁴정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 연구위원

Consideration on design procedure of room-and-pillar underground structure part I: parametric study

Chulho Lee¹, Jedon Hwang², Eunhye Kim³, Soo-Ho Chang^{4*}

¹Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Researcher

²ESCO Consultant & Engineers Co., Ltd

³ESCO Consultant & Engineers Co., Ltd

⁴Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Research Fellow

ABSTRACT: In this study, in order to suggest the design method for supports in the room-and-pillar underground structure, the case study was carried out. In the case study, shape of rock pillar and room was mainly considered. From the analysis, a displacement at the roof, the maximum principle stress and plastic state were examined. To optimize variables in the case study, cases from the Seoul metro station were analyzed, then a target depth of the underground structure and ground conditions were determined. And the height of rock pillar and room were chosen from the assumed purpose of underground space, i.e. living/office and warehouse. Total cases of analysis was 180 cases including 3 types of ground condition, 5 types of rock pillar and 6 types of roof span. It is expected that results from analysis can be used to determine the installation of support in room-and-pillar underground structure with stability, utilization efficiency of underground space and applicability of vehicles.

Keywords: Room and pillar method, Support, Numerical analysis, Design, Stability, Parametric study

초 록: 본 연구에서는 주방식 지하구조물에서 지보재 설계를 위한 매개변수 연구를 수행하였다. 지보재 설계에 앞서 설계에 필요한 암주와 공간의 형상별 천단변위, 최대 주응력, 소성영역에 대한 해석을 수행하였다. 해석에 사용할 매개변수를 최적화 하기위해 주방식 지하구조물의 대상 심도와 지반 조건은 기존 지하철 정거장 건설 사례를 분석하여 결정하였으며 지하공간의 활용 목적에 따라 암주의 형상과 공간의 형상을 설정하여 총 180가지의 경우를 선택하였다. 매개변수 해석을 통해 획득한 결과는 향후 지하구조의 안정성과 공간 활용성, 시공장비의 적용성을 고려하여 지보재 설계와 설치 여부를 판단할 수 있는 근거자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어: 주방식 공법, 지보재, 수치해석, 설계, 안정, 매개변수 연구

1. 서론

주방식 공법(Room and pillar method)은 광산분야

에서 시작된 공법으로서 수평 또는 거의 수평으로 매장되어 있는 광물을 채굴할 목적으로 적용되는 공법이다(Hartman and Mutmansky, 2002; Dariling, 2011). 주방식 공법이 적용된 광산에서는 여러 굴착면에서 동시에 작업이 이루어지는 방식으로 진행되기 때문에 생산성과 효율성이 높은 공법으로 알려져 있다. 또한 채광작업의 생산성과 효율을 높이기 위해

*Corresponding author: Soo-Ho Chang

E-mail: sooho@kict.re.kr

Received September 2, 2014; Revised September 19, 2014;

Accepted September 22, 2014

필요에 따라서 남겨 놓았던 암주를 채굴하기도 한다. 이러한 공법은 넓은 지역에 걸쳐 수평하게 분포하는 광물을 채굴하는 데에 이상적인 공법으로서 미국 등을 중심으로 사용되어 왔다(Lee et al., 2013a).

미국 캔자스(Kansas)에서는 1960년대부터 기존의 석회암 광산을 주방식 공법을 활용하여 확장하고 물류센터, 우편물 집중국, 사무실 등의 대규모 상업 지하 공간(Subtropolis)으로 활용하고 있다(Carmody and Sterling, 1993; Lee et al., 2013a). 이러한 주방식 지하 구조물에서 구조물의 안정성을 고려한 설계법은 자원 개발 분야에서의 설계법과는 성격이 다르다. 기존 자원개발에서의 주방식 채광은 채광 기간동안 단기간의 암주의 안정성을 유지할 수 있을 정도의 암주 설계를 통해 최대한 많은 채광량을 확보하는 것이 주안점이라면 공간 확보 측면에서의 주방식 굴착 공법은 중장기적인 공간 구조물의 안정성 확보에 더욱 주안점을 두어 천장부와 암주부가 연계된 하나의 통합 구조물로서 설계가 이루어져야 한다는 점이 다르다고 할 수 있다. 주방식 공법에서 설계된 암주의 규격은 추후에 변경되지 않으며, 천장부 설계와 암주부 설계가 단계적으로 분리되어 수행되지 않으므로, 하나의 연계 구조체로서 구조적 안전성을 확보하는 설계가 이루어져야 한다. 따라서, 공간확보 차원의 주방식 굴착에서는 전체 주방식 구조물이 상재하중을 중장기적으로 지지할 수 있어야 하고 암주 사이에 형성된 공간의 천장부(roof)와 각각의 암주가 안정성을 유지하여 공간 활용에 문제가 없어야 한다(Lee et al., 2013b).

기존 주방식 채광공법에서 암주의 설계는 암주의 강도와 암주의 응력상태를 고려하여 안전율을 산정하는 경험적인 방법으로 연구가 진행되어 왔다(Hedley & Grant, 1972; Hardy & Agapito, 1982; Kimmelmann et al, 1984; Potvin et al, 1989; Krauland & Soder, 1987; Lunder & Pakalnis, 1997; Sheorey et al, 2000). 이러한 방법들은 현장의 초기 응력 상태와 암주와 기반암 사이의 경계 조건 등을 고려하기 어려운 단점이 있다. 또한, 천장부(roof) 안정성 검토에는 암반의

경험적인 등급 분류를 통한 필요 지보재량 산정이 유효하고 수치해석 방법을 이용하여 불연속면의 영향을 고려하는 방법을 택하고 있다(Esterhuizen et al., 2011). 또한, 미국 NIOSH (Esterhuizen et al., 2011)에서 제시한 주방식 광산 설계 가이드라인에서는 천장부 설계에 대해 기존 주방식 또는 연속 채광 방식의 광산에서 붕괴 사례나 안정 사례 등을 수집하여 간단한 차트 형태로 천장부 설계 가이드라인을 제시하는데 그치고 있다.

주방식 지하구조의 안정성에 영향을 미치는 요소는 심도, 공간의 형상, 지반 조건 등이 있으며, 모든 요소를 고려한 안정성 해석에는 한계가 있기 때문에 본 연구에서는 매개변수를 최적화할 수 있는 세부항목을 우선 검토하였다. 연구에 고려된 항목은 시공성 및 이용자 접근성을 고려한 심도, 지하구조물이 적용 가능한 지반의 물성, 지하구조물 용도에 따른 굴착 높이, 암주와 공간의 형상이다. 각각의 조건에 대한 안정성 검토는 수치해석을 통해 수행되었으며 해석을 통해 주방식 지하구조의 천단변위, 최대주응력, 소성영역을 검토하였다. 본 연구의 결과는 설계에서 고려해야 할 공간의 형상을 결정하는 기초자료로 활용될 수 있으며 이를 통해 구조적 안정성 검토를 수행하여 지보 설치 여부를 판단할 수 있는 자료로 활용될 수 있다.

2. 설계 대상 조건 검토

2.1 대상 심도 및 지반 조건

도심지 지하구조물 건설을 위한 주방식 공법을 검토하기 위해 서울 지하철 1-3기에 건설된 지하철 정거장의 건설 심도를 분석하였다. Fig 1은 연구에서 고려한 서울 지하철 노선별 적용 심도를 나타낸다. 서울 지하철의 경우 1기 지하철을 시점으로 현재 3기 지하철(9호선)을 시공하고 일부 구간은 운용을 하고 있다. 건설 시기가 늦은 2-3기 지하철은 기존의 1기 지하철

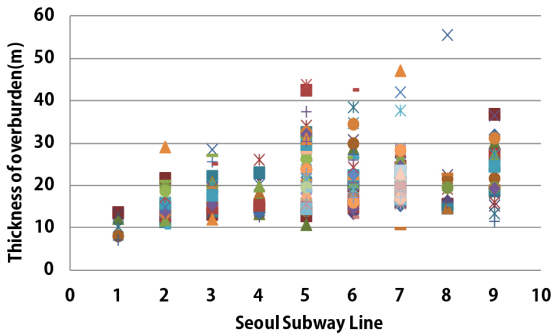


Fig. 1. Depth of Seoul subway stations from Line 1 to Line 9

이나 자동차 도로 등의 기 시공된 지하 시설물의 시공 간섭을 피하기 위해 시공 심도가 상대적으로 깊어졌다. 그림에서 나타나듯이, 1~3기 서울 지하철 정거장 중 약 90% 이상이 30 m 이하의 적용심도를 보이며, 1기 지하철의 모든 정거장은 30 m 이하에 건설되었다.

따라서, 본 연구에서는 주방식 지하구조물의 심도를 30 m로 적용하여 기존 지하 시설물 및 지하철과의 시공 간섭을 최소화할 수 있는 심도이고 주방식 지하구조물의 사용자 접근성이 양호할 것으로 판단하였다. 하지만, 부지 선정에 대한 제약이 있을 경우 주방식 지하구조의 적용 심도는 현장에 따라 달라질 수 있으며 이때에는 상재하중에 대한 고려가 설계 과정에서 우선 시 되어야 할 것이다. 이는 지하구조물의 안정성 검토의 기준이 되는 것이 상재하중이고 상재하중에 따라 설계 가능한 암주의 형상과 공간의 형상이 달라지고 지보재의 사용여부가 결정되기 때문이다.

주방식 지하구조물은 인간이 직접적으로 주거하거나 상업 시설물 등으로 활용이 되어야 하기 때문에 장기적인 안정성 확보가 중요하다. 또한, 주방식 지하구조물은 암주에 의해 상재하중을 지지하는 구조이므로 주방식 지하구조물을 연약한 지반에 계획하기는

어렵다. 상대적으로 연약한 지반에 주방식 지하구조물이 계획될 경우, 주어진 상재하중을 지지하기 위해서는 암주의 폭이 상대적으로 커져야 하므로 공간 활용성이 불량해지고 지보재 사용량이 늘어날 수 있어 경제성과 안정성 확보에 있어 불리하게 작용된다. 따라서, 본 연구에서는 서울시 도시철도에 적용된 지반 물성 중 보통암 및 경암의 지반 정수를 조사하여 Table 1과 같이 3가지 경우로 지반물성을 선정하고 해석에 적용하였다.

2.2 지하공간의 굴착 높이

도시 지하공간의 용도, 기능 및 형태는 지하철과 같이 광역적이고 대규모 네트워크를 구성하는 것에서부터 일반 건축물의 지하층을 이용하는 데에 이르기까지 다양한 형태로 사용이 가능하다. 지하공간의 용도는 지하에 수용되는 대상과 그곳에서 이루어지는 기능의 조합으로 분류될 수 있다. 지하공간에 수용되는 주요 대상이 사람일 경우, 거주나 생산, 사무, 교육, 문화와 같은 공간이 가능하고 물품일 경우, 에너지나 폐기물, 보존 자료, 창고 등의 공간이 가능하다. 또한 교통이나 상하수도, 전기, 가스와 같은 공급시설이나 정보의 저장을 목적으로 하는 지하 대규모 데이터 저장 시설도 고려가 가능하다. 지하공간의 기능에 따라서는 대상의 활동을 처리하는 기능으로써 물류센터나 역사, 터미널 등을 고려할 수 있고 운송을 위한 도로나 케이블, 운송 파이프, 도로 등이 고려가 가능하다. 저장의 기능을 위한 공간으로는 공원이나 피난소, 창고, 묘지, 주차장, 정보 저장 센터 등이 고려가 가능할 것이다.

주방식 지하구조의 가장 큰 장점은 운용 중에도

Table 1. Material Properties depends on type of rock

Type	Deformation Modulus (MPa)	Poisson's ratio	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion (MPa)	Friction Angle (°)
1	18,000	0.22	26	1.5	45
2	9,000	0.23	25	1.2	42
3	5,400	0.25	24	0.9	40

Table 2. Excavation height at different purpose of underground space

	Living / Office	Warehouse
Height of room	3.0 m	6.0 m

공간의 확장이 가능하다는 점이다. 따라서, 선형적인 지하구조물인 교통이나 공급처리 등에 적용하기 보다는 인간이 활동하는 각종 건축공간(주거 및 사무) 및 피난 광장, 물품을 위한 물류센터 및 창고, 정보시설물을 위한 데이터 저장 센터 등에 적용하기에 유리한 형태라고 할 수 있다. 본 연구에서는 대표적으로 주거 및 사무, 정보 처리 센터 등으로 이용 가능한 지하구조물과 물류센터, 창고 등으로 이용 가능한 지하구조물로 구분하여 Table 2와 같이 굴착 높이를 적용하였다.

2.3 압주 및 공간의 형상

채광에 적용되는 주방식 공법에서는 작업 시 압주의 안정성을 확보하기 위하여 압주의 폭(W)과 높이(H)의 비율(W/H)에 따른 압주의 거동이 중요하게 여겨진다. 압주의 폭이 작으면 상재하중에 대한 단위면적당 압주의 하중 부담이 증가하기 때문에 압주의 안정성이 저하되고 진행성 파괴, 좌굴 등의 위험이 지반조건과 토피고 등 다양한 조건에 따라 발생할 우려가 있다. 미국 캔자스 시티에 건설된 주방식 지하구조물인 Subtropolis의 압주 형상은 평균적으로 폭이 6 m, 높이가 5 m로 W/H의 비가 1보다 크다. 주방식 지하구조에서 압주의 폭이 크면 압주의 안정성 측면에서 유리하지만 공간 활용 측면에서는 불리해진다. 반대로 압주의 폭이 작아지면 공간 활용 측면에서는 유리하지만 안정성 측면에서 불리해진다. 따라서 설계에서는 안정성 확보와 공간 활용성 측면에서 모두 만족하는 적절한 압주 형상에 대한 검토가 필요하므로 본 연구에서는 앞서 검토한 압주의 높이(굴착높이 3.0 m와 6.0 m)에 따른 압주의 폭을 0.5 H~3.0 H로 변화시켜 굴착 시 압주 형상비(W/H)에 따른 압주의

거동 특성과 안전율 변화 추이를 분석하고 적정 폭을 검토하였다.

주방식 지하구조에서 공간(room)의 높이와 폭은 실제 사용 공간으로서 매우 중요한 의미를 가진다. 본 연구에서 제안하는 공간의 높이 3 m(주거/사무 공간)와 6.0 m(물류/창고형 공간)에 대해 평면적인 공간 확장 개념인 공간의 폭을 변화시켜 주방식 지하구조의 거동특성을 검토하였다. 공간의 폭을 점차 증가시키면 공간 상부에 작용하는 아칭효과의 감소로 압주에 전이되는 하중이 증가하게 되고 천장부에서는 변위가 증가되어 인장균열이 발달하여 안정성에 문제가 발생할 수 있다. 미국 NIOSH 가이드라인(Esterhuizen et al., 2011)에서는 천장부 너비(roof span)에 대해 여러 광산의 자료들을 수집한 사례 연구를 통해 적절한 너비를 Fig. 2와 같은 차트형태로 제시하고 있다. 그림에서 Stability Number의 해당 룬의 너비(Entry span)에서 안정하게 유지된 개수를 의미한다. 가이드라인에서는 폭이 10~15 m 일 때, 지보재 사용을 통해 대부분의 광산에서 안정된 시공이 가능하다고 보고하고 있다.

주방식 지하구조에서 공간의 폭이 증가하면 공간 활용 측면에서 유리하지만 압주 및 천장부 안정성

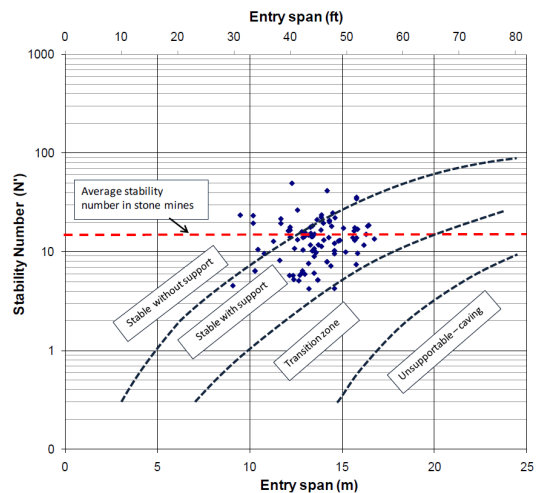


Fig. 2. Stability chart showing stone mine case histories (Esterhuizen et al., 2011)

Table 3. S/H ratio of the 'Living and Office' case (H=3.0 m) at different W/H ratio

W/H	S/H					
	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
3.0	W=9.0m S=3.0m	W=9.0m S=6.0m	W=9.0m S=9.0m	W=9.0m S=12.0m	W=9.0m S=15.0m	W=9.0m S=18.0m
2.0	W=6.0m S=3.0m	W=6.0m S=6.0m	W=6.0m S=9.0m	W=6.0m S=12.0m	W=6.0m S=15.0m	W=6.0m S=18.0m
1.5	W=4.5m S=3.0m	W=4.5m S=6.0m	W=4.5m S=9.0m	W=4.5m S=12.0m	W=4.5m S=15.0m	W=4.5m S=18.0m
1.0	W=3.0m S=3.0m	W=3.0m S=6.0m	W=3.0m S=9.0m	W=3.0m S=12.0m	W=3.0m S=15.0m	W=3.0m S=18.0m
0.5	W=1.5m S=3.0m	W=1.5m S=6.0m	W=1.5m S=9.0m	W=1.5m S=12.0m	W=1.5m S=15.0m	W=1.5m S=18.0m

Table 4. S/H ratio of the 'Warehouse' case (H=6.0 m) at different W/H ratio

W/H	S/H					
	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
3.0	W=18.0m S=6.0m	W=18.0m S=12.0m	W=18.0m S=18.0m	W=18.0m S=24.0m	W=18.0m S=30.0m	W=18.0m S=36.0m
2.0	W=12.0m S=6.0m	W=12.0m S=12.0m	W=12.0m S=18.0m	W=12.0m S=24.0m	W=12.0m S=30.0m	W=12.0m S=36.0m
1.5	W=9.0m S=6.0m	W=9.0m S=12.0m	W=9.0m S=18.0m	W=9.0m S=24.0m	W=9.0m S=30.0m	W=9.0m S=36.0m
1.0	W=6.0m S=6.0m	W=6.0m S=12.0m	W=6.0m S=18.0m	W=6.0m S=24.0m	W=6.0m S=30.0m	W=6.0m S=36.0m
0.5	W=3.0m S=6.0m	W=3.0m S=12.0m	W=3.0m S=18.0m	W=3.0m S=24.0m	W=3.0m S=30.0m	W=3.0m S=36.0m

측면에서 불리해진다. 반대의 경우에는 안정성 측면에서 유리해지지만 공간 활용성 측면에서는 불리해진다. 본 연구에서는 적절한 공간의 형상 검토를 위해 연구에서 고려된 압주의 높이(3.0 m와 6.0 m)에 따른 공간의 폭을 1.0 H~6.0 H로 변화시키면서 굴착 시 공간 형상비(S/H)에 따른 특성을 분석하고 적절한 공간의 폭을 검토하였다. 연구에서 고려한 공간 활용 목적에 따른 검토 대상은 다음 Table 3과 4와 같다.

3. 수치해석

주방식 지하구조의 설계 조건별 안정성 검토는 수치해석을 통해 수행되었다. 해석에 사용된 프로그램은 유한 차분법을 이용한 FLAC2D이다. Fig. 3은 해석

에 사용된 수치해석 모델의 개략도와 격자를 나타낸다. 그림에서 S는 름의 너비, W는 압주의 너비, H는 압주의 높이 그리고 Z는 심도를 나타낸다. 연구에서 고려한 지반 물성을 고려하여 지반 조건은 Mohr-Coulomb 파괴 기준을 사용하였으며 측압계수는 1.0을 적용하였다. 토피고는 30 m로 설정하였으며 굴착 높이는 지하공간 활용 목적에 따라 3.0 m와 6.0 m를 적용하였다. 굴착으로 인한 영향을 고려하여 좌우측 경계는 공간 형상에 따라 4D이상 확대하여 해석을 적용하였다. 해석에 적용된 지반 조건, 압주의 형상, 공간의 형상에 관한 조건은 Table 5에 정리하였다. 해석은 연구에서 고려된 지반조건으로 3가지, 굴착 높이 2가지, 압주의 형상 조건 5가지, 공간의 형상 조건 6가지로 총 180가지의 경우에 대해 해석을 수행

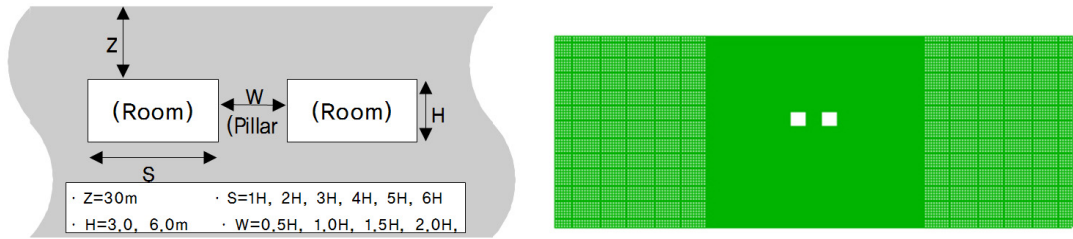


Fig. 3. Schematics and mesh of numerical model

Table 5. Cases considered in numerical analysis

Factor		Condition						No. of case
Depth (m)		30						1
Ground condition (kPa)		18,000	9,000			5,400		3
Shape	Height (m)	3.0			6.0			2
	Width (m)	Pillar	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	5
		Room	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
Total								180

하였다. 해석에서는 천장부 천단 변위, 최대 주응력의 크기, 소성영역 발생 지점을 검토하였으며 개념적인 접근을 통해 설계 최적화를 위한 매개변수 연구로 수행되었다.

4. 결 과

Fig. 4와 5는 암주와 공간의 형상에 따른 천단변위를 대표적으로 S/H=3.0인 경우와 W/H=2.0인 경우에서 공간의 높이가 3.0 m와 6.0 m에 대한 해석 결과를

나타낸다. 암주의 형상 및 공간의 형상에 따른 천단변위는 지반조건이 양호할수록, 암주의 폭이 증가할수록 감소하고 공간의 폭이 증가할수록 증가하는 경향을 보인다. 이는 암주의 상태가 양호하고 상재하중에 대한 하중 분담이 낮아질수록 공간의 안정성이 증가하는 것이며 가장 불량한 조건인 암주의 폭이 가장 작고 공간의 높이가 큰 경우 약 4.5 mm 발생하였다. 암주의 높이가 3.0 m일 때 지반조건이 가장 불량한 조건에서 나타난 천단 변위는 암주의 높이가 6.0 m인 경우에서 지반조건이 가장 양호한 조건과 유사하게

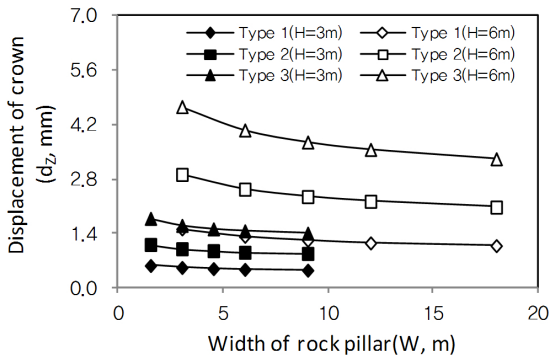


Fig. 4. Displacement at the roof depending on width of rock pillar (S/H=3.0)

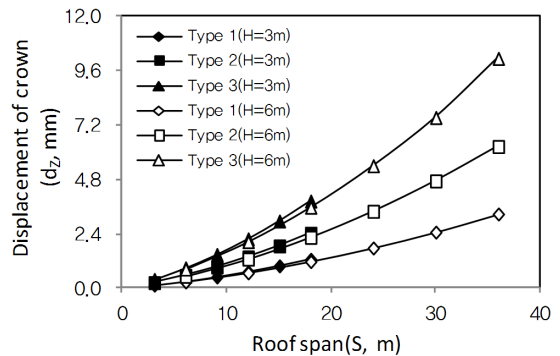


Fig. 5. Displacement at the roof depending on roof span (W/H=2.0)

나타났다. 또한, 주어진 지반조건에 의한 천단 변위의 크기가 공간의 높이에 따른 변위의 증가가 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 암주의 형상에 따른 암주의 높이별 천단 변위는 암주 높이가 6.0 m일 때 가장 큰 것으로 나타났으나, 공간의 형상에 따른 천단 변위는 공간의 폭이 동일할 경우 암주의 높이에 따른 변화는 거의 없는 것으로 나타났다.

Fig. 6과 7은 암주와 공간의 형상에 따른 최대 주응력을 대표적으로 S/H=3.0인 경우와 W/H=2.0인 경우에서 공간의 높이가 3.0 m와 6.0 m에 대한 해석 결과를 나타낸다. 암주 형상 및 공간의 형상에 따른 최대 주응력은 지반조건이 양호할수록 공간의 폭이 증가할수록 증가하고, 암주의 폭이 증가할수록 감소하는 경향을 보였으나 지반조건에 따른 영향은 암주의 폭과

공간의 너비에 대한 영향보다 상대적으로 작았다. 암주의 형상에 따른 암주 높이별 최대주응력은 암주 높이가 6.0 m일 때 가장 큰 것으로 나타났으며 공간의 형상에 따른 암주 높이별 최대 주응력은 공간의 폭이 동일할 경우에 암주 높이가 3.0 m일 때 가장 큰 값으로 나타났다.

Table 6과 7은 대표적으로 공간의 높이가 3.0 m이고 지반조건이 가장 유리한 경우와 공간의 높이가 6.0 m이고 지반조건이 가장 불량한 조건에서 암주와 공간의 형상에 따른 소성영역 분포를 나타낸다. Table 5의 조건에서는 W/H가 1.0~3.0인 구간에서는 소성영역이 발생하지 않았으나 W/H가 가장 낮은 0.5인 구간에서 암주부분에 소성영역이 발생하였다. Table 6의 조건에서는 모든 영역에서 소성구간이 발생하였으며

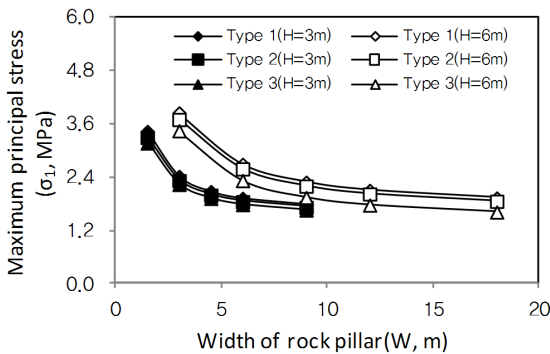


Fig. 6. The maximum principal stress at different width of rock pillar (S/H=3.0)

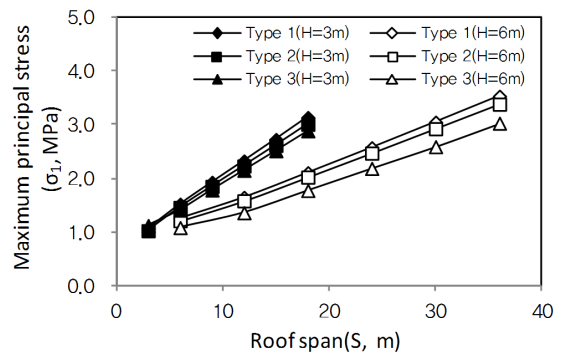


Fig. 7. The maximum principal stress at different roof span (W/H=2.0)

Table 6. Plastic propagation of 'Living and Office' case at different W/H and S/H ratio

W/H	S/H=1.0	S/H=2.0	S/H=3.0	S/H=4.0	S/H=5.0	S/H=6.0
3.0	□ □	□ □	□ □	□ □	□ □	□ □
2.0	□ □	□ □	□ □	□ □	□ □	□ □
1.5	□ □	□ □	□ □	□ □	□ □	□ □
1.0	□ □	□ □	□ □	□ □	□ □	□ □
0.5	□ □	□ □	□ □	□ □	□ □	□ □

Table 7. Plastic area propagation of 'Warehouse' case at different W/H and S/H ratio

W/H	S/H=1.0	S/H=2.0	S/H=3.0	S/H=4.0	S/H=5.0	S/H=6.0
3.0						
2.0						
1.5						
1.0						
0.5						

암주의 폭이 감소하고 공간의 폭이 증가할수록 소성영역이 크게 발생하였다. 특히 S/H=6.0이고 W/H=0.5인 경우(가장 안정성이 취약한 경우) 소성영역이 가장 크게 발생하였다. 천단 변위와 최대 주응력 해석 결과에서와 같이 암주의 폭이 작고 공간의 폭이 큰 경우 구조적으로 가장 불안정한 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 수치해석을 통하여 지하구조물에 주방식 공법을 적용하기 위한 매개변수 연구를 수행하였다. 서울 도시 지하철 정거장의 시공 사례를 분석하여 시공성 및 이용자 접근성을 고려한 주방식 지하구조의 대상 심도는 30 m로 결정하였으며 대상 지반의 조건은 3가지를 선택하였다. 지하구조물의 활용 목적에 따른 굴착 높이는 지하공간의 건설 목적에 따라 크게 2가지로 분류하여 해석 조건으로 총 180가지의 경우를 고려하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 주어진 지반조건에 대한 해석결과, 전체적으로 천단 변위의 크기는 공간의 높이와 폭이 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 암주의 형상에 따른 암주의 높이별 천단 변위는 암주 높이가 6.0 m일 때 가장 큰 것으로 나타났으나, 공간의 형상에

- 다른 천단 변위는 공간의 폭이 동일할 경우 암주의 높이에 따른 변화는 거의 없는 것으로 나타났다.
2. 암주 형상 및 공간의 형상에 따른 최대 주응력은 지반조건이 양호할수록 공간의 폭이 증가할수록 증가하고, 암주의 폭이 증가할수록 감소하는 경향을 보인다. 암주의 형상에 따른 암주 높이별 최대주응력은 암주 높이가 6.0 m일 때 가장 큰 것으로 나타났으며 공간의 형상에 따른 암주 높이별 최대 주응력은 공간의 폭이 동일할 경우에 암주 높이가 3.0 m일 때 가장 큰 값으로 나타났다.
 3. 암주와 공간의 형상에 따른 소성영역은 암주의 폭이 작고 공간이 폭이 넓은 경우와 같이 구조적으로 불안정한 경우(S/H=6.0, W/H=0.5)에 가장 크게 발생하였으며 형상에 따라 소성영역의 크기가 다르게 나타났다.
 4. 해석에서 나타난 천단변위, 최대 주응력, 소성영역은 설계 시 지보 설치 여부를 판단하는 기준으로 사용될 수 있으며 공간의 활용 목적과 건설 대상 지반의 크기에 따라 공간의 형상을 선택할 때 설계자가 고려할 수 있는 지하구조의 형상을 판단할 수 있는 근거로 사용될 수 있다. 따라서, 주어진 지하 건설 부지의 크기와 암주 형상에 따른 공간활용 효율성과 구조적 안정성, 지하굴착 시 가용한 시공장비의 적용성 등을 감안하여 지보재 설치 여부를 판단할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업인 “운용 중 공간확장이 가능한 지하 굴착 및 안정화 기술 개발”의 연구비 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. Darling, P. (2011), *Mining Engineering handbook, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, INC.(SME)*, 3rd Edition.
3. 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.
4. Hardy, P., Agapito, J.F.T. (1982), “Induced horizontal stress method of pillar design in oil shale”, XV Oil Shale Symp. Colorado School of Mines, Golden, Colorado.
5. Hartman, H.L., Mutmansky, J.M. (2002), *Introductory Mining Engineering*, 2nd edition, Wiley, New Jersey.
6. Hedley, D.G.F., Grant, F. (1972), “Stope-and-pillar design for the Elliot Lake Uranium Mines”, Bull. Can. Inst. Min. Metallurg. Vol. 63, pp. 37-44.
7. Kimmelman, M.R., Hyde, B., Madgwick, R.J. (1984), “The use of computer applications at BCL limited in planning pillar extraction and design of mining layouts”, In: Proc., ISMR Symp. Design and Performance of Underground Excavations. Brit. Geotech. Soc., London, pp. 53-63.
8. Krauland, N., Soder, P.E. (1987), “Determinating pillar strength from pillar failure observations”, Eng. Min. J. Vol. 8, pp. 34-40.
9. Lee, C., Chang, S.-H., Shin, H.-S. (2013a), “A numerical study on evaluation of unsupported pillar strength in the room and pillar method”, J. of Korean Tunn Undergr Sp Assoc, Vol. 15, No. 4, pp. 443-453 (in Korean).
10. Lee, C., Chang, S.-H., Shin, H.-S. (2013b), “A study on conceptual evaluation of structural stability of room-and-pillar underground space”, J. of Korean Tunn Undergr Sp Assoc, Vol. 15, No. 6, pp. 585-597 (in Korean).
11. Lunder, P.J., Pakalnis, R. (1997), “Determination of the strength of hard-rock mine pillars”, Bull. Can. Inst. Min. Metall. Vol. 90, pp. 51-59.
12. Potvin, Y., Hudyma, M.R., Miller, H.D.S. (1989), “Design guidelines for open stope support”, Bull. Can. Min. Metall. Vol. 82, pp. 53-62.
13. Sheorey, P.R., Loui, J.P., Singh, K.B., Singh, S. K. (2000), “Ground subsidence observations and a modified influence function method for complete subsidence prediction”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 37, pp. 801-818.