

3차원 수치해석모델을 이용한 주방식 지하공간의 안정성 평가

강병윤¹ · 방상혁² · 노충기³ · 김동관^{4*}

¹정회원, (주)수성엔지니어링 대표이사

²정회원, (주)디엘이앤씨 토목스마트엔지니어링팀 부장

³비회원, (주)수성엔지니어링 터널지반부 이사

⁴정회원, (주)수성엔지니어링 터널지반부 대리

Stability evaluation of room-and-pillar underground method by 3D numerical analysis model

Byung-Yun Kang¹ · Sanghyuk Bang² · Choong-Ky Roh³ · Dongkwan Kim^{4*}

¹President, Soosung Engineering Co., Ltd.

²General Manager, Smart-Engineering Team, DL E&C

³Director, Geotechnical and Tunnel Dept., Soosung Engineering Co., Ltd.

⁴Assistant Manager, Geotechnical and Tunnel Dept., Soosung Engineering Co., Ltd.

*Corresponding Author : Dongkwan Kim, dkkim@soosungeng.com

Abstract

In this study, the stability of the room-and-pillar underground method was investigated using numerical analysis method. In-situ geotechnical investigation was conducted, and a supporting pattern was selected based on the geotechnical investigation data. For the supporting pattern, Type-1, 2, 3 were selected for each ground condition. A 3D numerical analysis model was developed for effective simulation as the room-and-pillar underground method consist of a pillar and room. As a review of numerical analysis, it was confirmed that the crown settlement, convergence, shotcrete and rock bolt were all stable in all supporting patterns. As a result of the analysis by the construction stage, it was confirmed that excessive stress was generated in the room when the construction stage of forming pillar. So, precise construction is required during the actual construction stage of the pillar formation.

Keywords: Room-and-pillar underground method, 3D numerical analysis, Supporting pattern

초 록

본 연구에서는 수치해석을 이용해 주방식 지하공간의 안정성을 검토하고 고찰하였다. 수치해석을 수행하기에 앞서 현장지반조사를 수행하고 지반조사결과를 이용하여 지보

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
25(1)1-11(2023)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2023.25.1.001>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received November 10, 2022

Revised November 30, 2022

Accepted December 5, 2022



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 © 2023, Korean Tunnelling and Underground Space Association

www.kci.go.kr

패턴을 선정하였다. 지보패턴은 암반 등급 별 Type-1, 2, 3을 선정하였으며 주방식 지하공간은 암주와 지하공간으로 구성된 형상으로 구성되어 효과적인 모사를 위해 3차원 수치해석모델을 개발하였다. 지보패턴 안정성 검토결과, 모든 지보패턴에서 천단변위, 내공변위, 지보재 응력 모두 안정한 것으로 확인되었다. 시공단계에 의한 해석결과, 암주가 형성되는 시공단계에서 지하공간에 과도한 응력이 발생하는 경향이 확인되었다. 이를 통해, 실제 시공 시 암주 형성 시공단계에서 정밀한 시공이 요구될 것으로 판단된다.

주요어: 주방식 지하공간, 3차원 수치해석, 지보패턴

1. 서론

광산은 실생활에 필요한 생산의 목적물 즉, 광석과 그 외 암반으로 구성된다. 이 때, 광산에서는 광석 채굴 중 작업자와 공간의 안정성 확보가 중요하고 이에 대한 적절한 채굴 공법 선정이 중요하다. 채굴공법으로는 지보의 유무에 따라 무지보공법, 지보공법 등으로 구분 가능하며 무지보공법으로는 주방식 채굴법(room-and-pillar mining), 중단 채굴법(sublevel stoping), 슈린키지 채굴법(shrinkage stoping) 등이 있고 지보공법으로는 충전식 채굴법(cut & fill mining), 스퀘어셋 채굴법(square-set mining), 벤치 충전식 채굴법(bench & fill stoping) 등이 있다. 무지보공법은 채굴완료 후 상재 하중을 지지하기 위한 별도의 지지체가 없는 공법을 말하고 지보공법은 채굴 완료 후 광상을 굴착된 폐석 등으로 충전하며 채굴을 진행하는 방법(충전식 채굴법) 등과 같이 지지체를 통해 상부 하중을 지지하는 공법을 일컫는다(KICT, 2017).

주방식 공법(room-and-pillar mining)은 무지보 공법의 하나로써 광산에서 굴착되지 않은 암반에 지지구조체인 암주의 역할을 부여하고 그 외 광석이 채굴된 부분은 지하공간의 형태를 갖는 공법을 말한다. 국내에서는 약 10곳 이상의 석회석 광산에서 주방식 공법이 적용되고 있으며 제원은 갱도 폭 6~30 m, 갱도 높이 6~8 m, 형상비(폭/높이) 1.0~5.0까지 다양하고 분포 비율로 보면 갱도 폭 10~14 m, 갱도 높이 6~7 m가 가장 높은 비율을 차지하는 것으로 나타났다(KORES, 2019). 국외에서는 미국(springfield underground, iron mountain, infobunker, westland bunker), 노르웨이(green mountain data center), 스웨덴(pionen data center) 등 다양한 국가에서 주방식 공법을 이용하여 채굴한 후 현재는 지하창고 및 데이터 센터 등으로 활용하고 있다.

채굴이 완료된 후의 광산은 일정한 온도, 습도 유지가 가능하고 외기의 영향을 최소화 할 수 있는 공간이라는 장점을 이용하여 지하창고, 데이터 센터 등으로 활용 가능하다. 그러나, 생활공간으로 사용될 경우 광석 채굴 시와 별도로 장기적인 안정성과 공간활용성을 만족하는 지하공간의 단면 설계가 필요하고 암주는 지지구조체로 충분한 강도를 확보해야 하며 형성된 지하공간 또한 생활공간으로써 안정성 확보가 요구된다.

지하공간의 안정성은 다양한 매개변수의 영향을 받으며 주된 매개변수로는 지반조건, 지하공간 형상(암주 높이, 암주 폭, 지하공간 폭) 등이 있으며, 암주 폭이 작고 공간이 큰 경우 구조적으로 가장 불안정한 것으로 나타났다(Lee et al., 2014a). 암주의 안정성은 안전율을 이용하여 평가하는 방법이 주로 사용되며 안전율 평가 시 사용되는

암주 응력, 암주 강도는 경험식을 통해 산정가능하고 2차원 수치해석모형을 이용한 암주 응력, 암주 강도 획득에 대한 연구가 수행되었다(Lee et al., 2013). 지하공간 안정성은 암주의 안전을 및 지하공간의 한계변형률을 복합적으로 검토하여 이용하였으며, 그 결과 암주의 형상비(W/H)와 지하공간의 형상비(S/H)가 감소할수록 암주의 안정성은 증가하였으나 점차 수렴하는 경향을 보였다(Lee et al., 2014b).

본 연구에서는 2차원 수치해석모형을 이용하여 수행되었던 기존 연구내용을 토대로 주방식 지하공간의 직접적인 형상 모사를 위해 3차원 수치해석모형을 이용하여 주방식 지하공간의 안정성에 대해 검토하였다. 주방식 지하공간 안정성 평가는 현장지반조사결과를 토대로 지보패턴을 결정하고 수치해석모형을 이용하여 지하공간 내 변위와 지보재의 응력 안정성 검토를 통해 지하공간의 안정성 검토를 수행하였다.

2. 주방식 지하공간 공법

주방식 지하공간 공법(room-and-pillar underground method)은 Fig. 1과 같이 암주(pillar)가 지지구조체로서의 기능을 하고 채굴이 완료된 후 지하공간(room)을 형성하는 공법을 말한다. Fig. 1과 같이 암주와 지하공간으로 이뤄진 주방식 지하공간의 안정성은 지반조건, 암주 형상비(W/H), 지하공간 형상비(S/H)의 영향을 받는다(Lee et al., 2014a). 주방식 지하공간 공법에서 지반조건은 연약한 지반에 본 구조물이 시공될 경우 상부 하중을 지지하기 위해 과도한 암주 폭이 요구되고 암주 폭의 증가는 지하공간의 공간활용성의 저하로 이어질 수 있다. 따라서, 기존 연구에서는 보통암~경암의 지반 정수를 조사하여 이용하였으며 암주의 형상비(W/H)는 1.0~1.5, 지하공간 형상비(S/H)는 2.0~3.0일 때 안정성 및 공간활용성을 만족하는 것으로 나타났다(Lee et al., 2014a; 2014b).

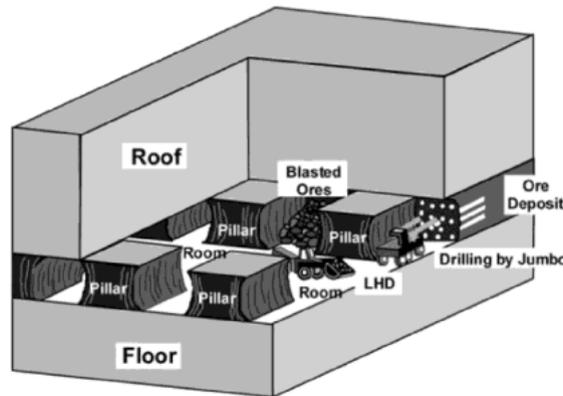


Fig. 1. Room-and-pillar mining (Okubo and Yamatomi, 2009)

주방식 지하공간의 설계에 이용된 현장은 항만배후단지부지로써 경상남도 창원시 진해구 안골동에 위치하고 있다. 항만배후단지 조성 시 기존존재하는 석산 제거가 요구되고 석산 제거 및 제거된 석재 운반 시 소음과 비산 먼

지로 인한 민원이 발생할 것으로 판단하였다. 석재 운반 시 발생하는 소음 및 비산먼지 최소화를 위해 공법 선정을 도모하였고 수직구와 지하공간을 이용한 운반을 계획하였다. 수직구와 지하공간을 이용한 운반 후 일정 이상의 상부 석재가 제거된 후에는 상재 하중이 감소하고 그에 따라 지하공간 내부를 추가 굴착을 통해 주방식 지하공간으로 조성하여 추후 지하창고 또는 생활공간으로 사용하는 것을 목적으로 설계하였다.

주방식 지하공간을 생활공간으로 활용하기 위해서는 공간의 활용성 및 안정성의 확보가 중요하고 이에 대한 연구가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 기존 연구 사례를 바탕으로 설정된 지반조건 및 암주의 형상비, 지하공간의 형상비를 이용하여 실제 주방식 지하공간의 단면을 설정하였으며 상용 유한요소해석 프로그램 Midas GTS NX를 이용하여 주방식 지하공간의 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 현장지반조사를 수행하고 지반조사결과를 바탕으로 지보패턴을 선정한 후 지보패턴 및 시공단계가 고려된 주방식 지하공간 수치해석모델을 개발하였으며 개발된 수치해석모델을 이용하여 안정성 검토를 수행하였다.

3. 수치해석

3.1 해석조건

주방식 지하공간은 무지보공법으로 지하공간 내 지보없이 암반자체로써 상부 하중을 지지한다는 가정의 공법이지만 필요에 따라 부분적인 숏크리트 및 천정부 록볼트를 기존 사례를 통해 사용하고 있다(Lee et al., 2014b). 따라서, 주방식 지하공간의 안정성 검토는 지하공간의 변위 및 지보재 응력 검토를 통해 수행되었으며, 현장 위치는 경상남도 창원시 진해구 안골동 옥망산 일원으로 대표 지층은 안산암질 화산각력암으로 이뤄져있고 해석을 수행하기 위해 현장지반조사결과를 이용한 지보패턴 선정 및 설계지반정수를 선정하였다.

지보 설계는 현장지반조사를 이용한 RMR 분류법과 Q-system을 기준으로 지반 특성 및 굴착 단면적 등을 고려하여 지보패턴을 선정하였으며 선정결과는 Table 1과 같다.

Table 1. Room-and-pillar underground supporting pattern

Supporting pattern	RMR	Q	Excavation method	Unsupported tunnel length	Thickness of shotcrete	Rock bolt	
						Length	Spacing (L/T) ^{a)}
Type-1	81~100	221.8~	Full-face excavation	3.0 m	50 mm	4 m	Random
Type-2	61~80	20.3~221.8		2.5 m	80 mm		2.5 m/2.0 m
Type-3	41~60	1.9~20.3		2.0 m	120 mm		2.0 m/1.5 m

a) L: Longitudinal, T: Transversal

주방식 지하공간 안정성 해석을 수행하기 위해서는 설계지반정수의 산정이 요구된다. 설계지반정수는 현장지반조사결과 분석을 통해 산정하였으며 산정결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Properties used in numerical analysis

Grade of rock mass	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)	Deformed modulus (MPa)	Poisson's ratio	K ₀
I	26.0	6,800	45.0	31,000	0.19	1.0~2.5
II	25.5	3,500	40.5	16,000	0.21	
III	24.5	1,700	36.0	10,000	0.23	

3.2 Geometry

주방식 지하공간은 I~Ⅲ등급 암반에서 암주 형상비(W/H) 1.0, 지하공간 형상비(S/H) 2.0으로 단면을 설정하였으며 굴착부 요소와 암주 요소는 세밀하게, 외부 경계에 근접하는 요소는 상대적으로 크게 모델링하였다. 유한요소해석모델의 형상은 Fig. 2와 같다. 모델링은 I~Ⅲ등급의 지반에서 동일한 단면을 설정함에 따라 지하공간 굴착에 따른 지하공간 안정성을 확인하기 위해 지하공간의 일부분만 모델링하여 4개의 암주와 지하공간으로 형성하였으며 상세 모델링 제원은 Table 3과 같다. 구성방정식은 각각 탄소성 거동을 하는 지반은 Mohr-Coulomb 모델, 탄성 거동을 하는 지보재(록볼트, 슛크리트)는 Elastic 모델로 설정하였다. 경계 조건은 자중 및 측면은 롤러, 하부면은 힌지로 적용하였다.

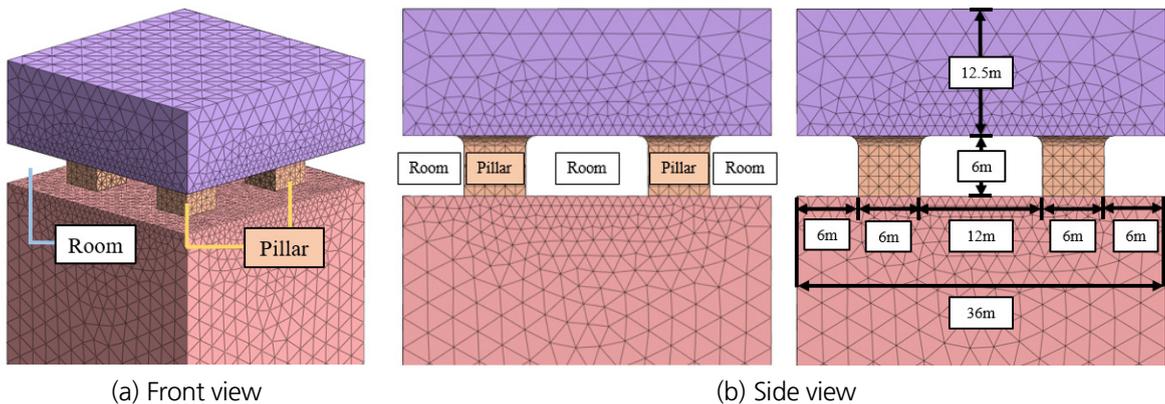


Fig. 2. FEM model mesh geometry

Table 3. Sizes of each section in the numerical model

Section	Size
Pillar	6.0 m (width) × 6.0 m (length) × 6.0 m (height)
Upper ground	12.5 m (height)
Room	12.0 m (width) × 6.0 m (height)

시공단계는 암주의 외곽부가 굴착된 상태에서 암주와 암주사이의 공간을 지보패턴 별 굴진장을 모사하여 순차적으로 굴착하고(Fig. 3) 다음 막장 굴착 시 이전 굴착부에 지보재를 설치하도록 모델링하였으며 최종적으로 지표면에는 공원부지 및 실생활 공간 조성에 따라, 시공 중 장비 하중과 구조물 하중을 산출하여 50 kN/m^2 의 하중을 재하하였다. 안정성 검토에 이용된 결과값은 굴착된 지하공간 내에서 발생한 천단변위, 내공변위, 록볼트 축력, 숏크리트 응력을 검토하였다.

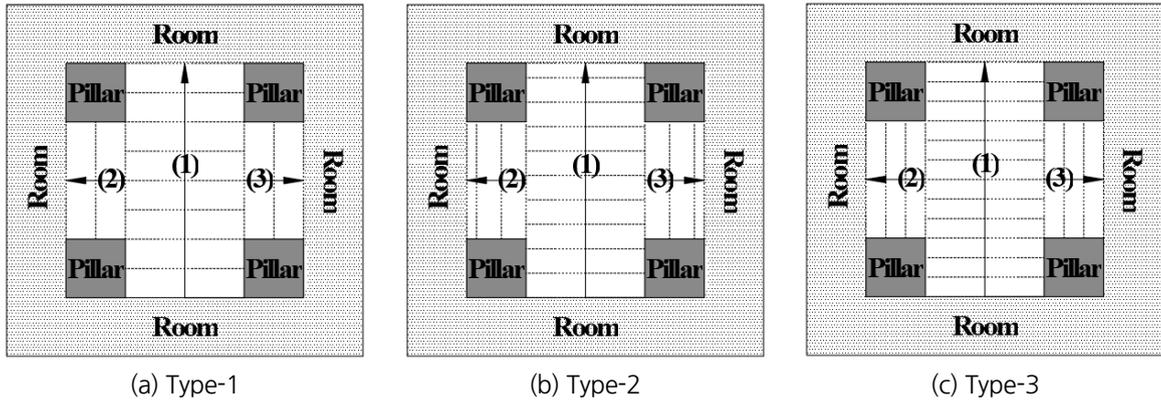


Fig. 3. Construction stage of each supporting pattern

4. 주방식 지하공간 안정성 검토

4.1 지보패턴 별 안정성 해석

주방식 지하공간의 안정성은 개발된 수치해석모델을 이용하였으며, 각 지보패턴 별 해석을 수행하여 안정성을 검토하였다. 천단변위의 허용값은 프랑스 공업성의 관리기준에서 토피고 10~50 m의 경암지반의 1~2 cm 중 안전측 값(1 cm)를 적용하였으며 내공변위의 허용값은 일본의 비도건설 관리기준의 경암지반에서 주의레벨 I에 해당하는 2~3 cm 중 안전측 값(2 cm)을 적용하였다.

데이터의 측정위치는 천단변위와 내공변위는 암주와 암주사이에서 가장 큰 값이 도출되어 해당위치에서의 데이터를 취득하였으며 지보재의 경우 시공단계의 영향을 받아 시공단계 중 가장 큰 결과값이 나타나는 지점의 값을 취득하였다.

Type-1은 1등급 암반에서의 지보패턴을 적용하였으며, 해석결과는 Figs. 4, 5, Table 4와 같다.

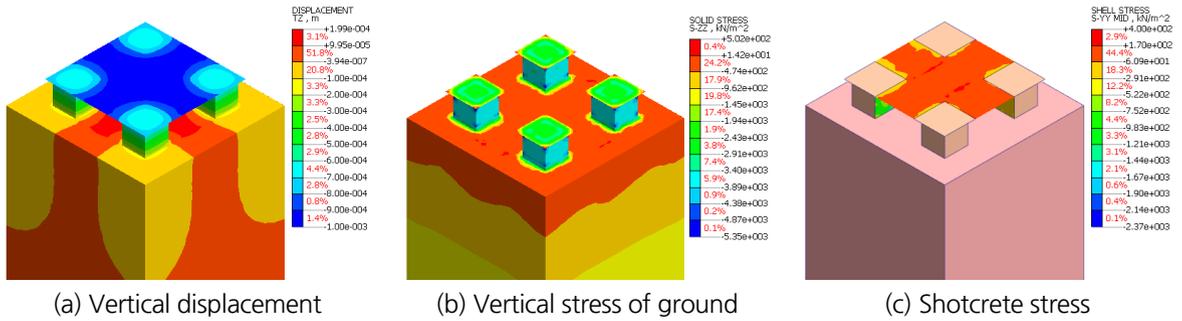


Fig. 4. Diagram of the Type-1 model

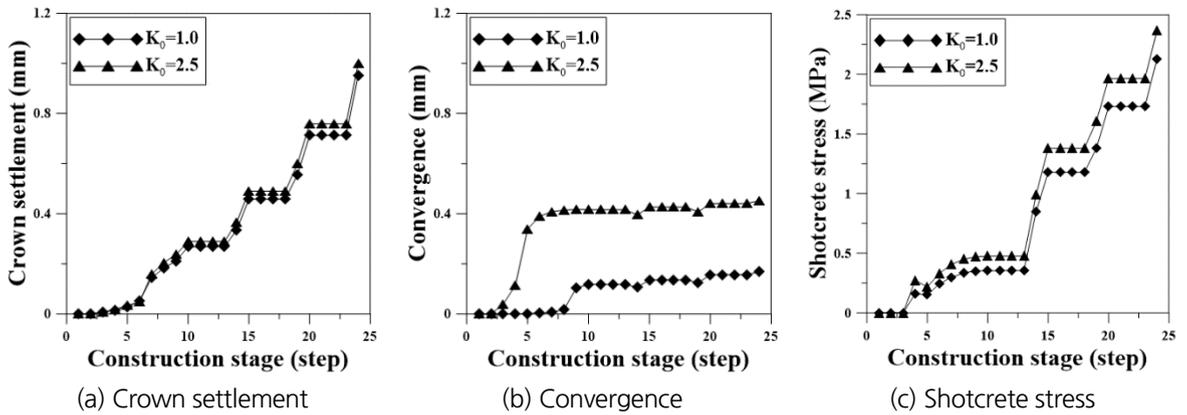


Fig. 5. Result of numerical analysis (Type-1)

Table 4. Result of numerical analysis (Type-1)

Class	Crown settlement (mm)	Convergence (mm)	Shotcrete compressive stress (MPa)	Rock bolt axial force (kN)
Result	1.00	0.45	2.37	-
Allowable value	10.0	20.0	14.0	-
Stability	O.K	O.K	O.K	-

Type-2는 2등급 암반에서의 지보패턴을 적용하였으며, 해석결과는 Figs. 6, 7, Table 5와 같다.

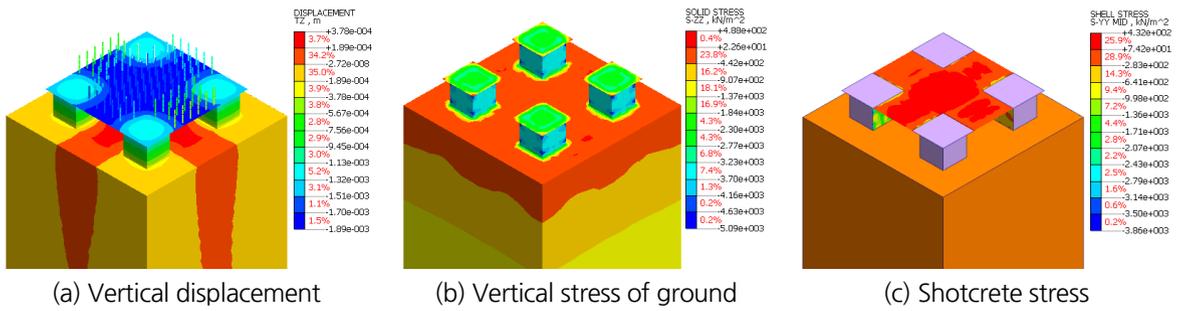


Fig. 6. Diagram of the Type-2 model

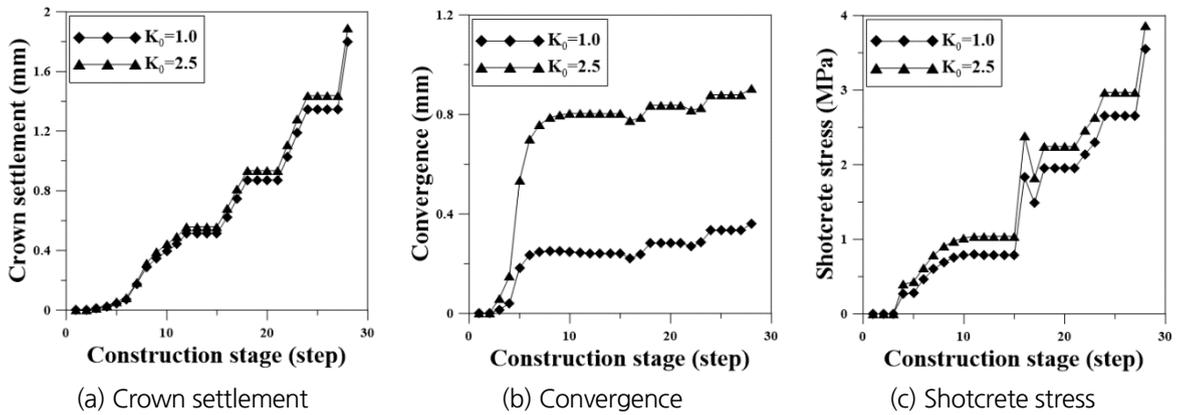


Fig. 7. Result of numerical analysis (Type-2)

Table 5. Result of numerical analysis (Type-2)

Class	Crown settlement (mm)	Convergence (mm)	Shotcrete compressive stress (MPa)	Rock bolt axial force (kN)
Result	1.89	0.91	3.86	3.07
Allowable value	10.0	20.0	14.0	101.34
Stability	O.K	O.K	O.K	O.K

Type-3은 3등급 암반에서의 지보패턴을 적용하였으며, 해석결과는 Figs. 8, 9, Table 6과 같다.

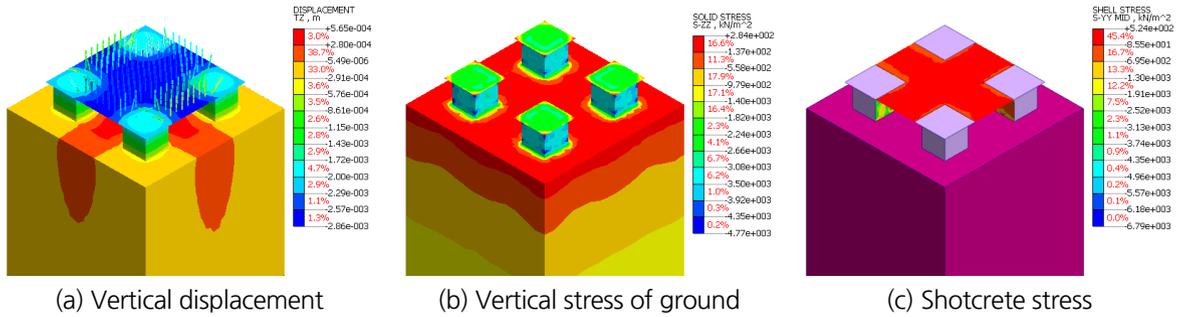


Fig. 8. Diagram of the Type-3 model

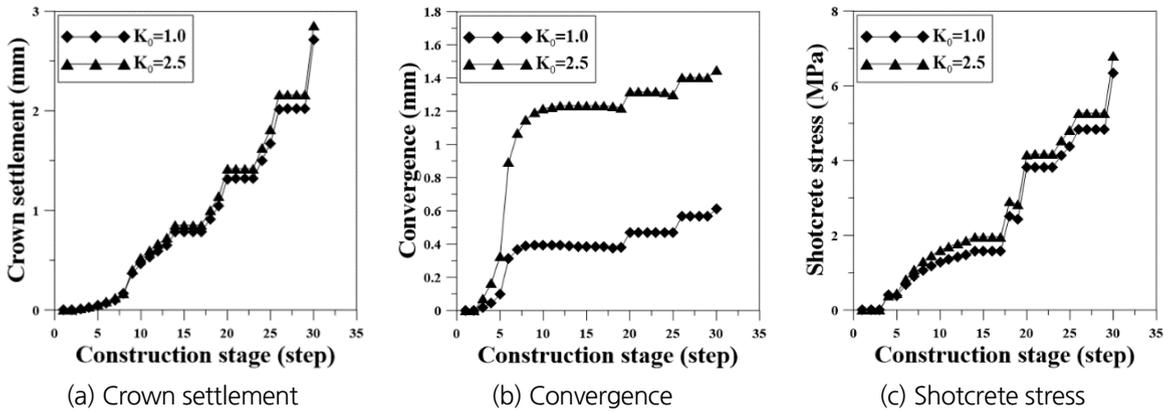


Fig. 9. Result of numerical analysis (Type-3)

Table 6. Result of numerical analysis (Type-3)

Class	Crown settlement (mm)	Convergence (mm)	Shotcrete compressive stress (MPa)	Rock bolt axial force (kN)
Result	2.86	1.45	6.79	5.11
Allowable value	10.0	20.0	14.0	101.34
Stability	O.K	O.K	O.K	O.K

Type-1, 2, 3 해석결과, 암반등급이 낮을수록 천단변위, 내공변위, 지보재 응력이 상승하는 경향을 보였고 이는 해석의 입력치로 사용되는 암반의 물성치가 해석 결과에 지배적인 영향을 미치기 때문으로 판단된다. 또한, K_0 값이 클수록 천단변위, 내공변위, 지보재 응력이 상승하는 경향을 보였으나, 모두 허용값 이내에 드는 것으로 확인되었다. 단, 내공변위의 경우 K_0 가 증가할수록 큰 폭으로 상승하는 결과가 나타났으며 이는 축압계수인 K_0 가 커질수록 지중수평응력이 상승한 결과로 판단된다.

4.2 결과 및 토의

해석결과, 지보패턴 별 천단변위, 내공변위, 지보재 응력은 모든 지보패턴에서 안정한 것으로 검토되었다. 지보패턴 별 해석 결과값은 Type-1에서 가장 작고, Type-3에서 가장 큰 결과가 나타났다. 이는, 암반의 등급이 1등급, 2등급, 3등급으로 변화함에 따른 지반 물성 감소에 따른 영향으로 판단된다.

시공단계가 진행됨에 따라 해석 결과값(천단변위, 내공변위, 지보재 응력)은 점차 증가하는 결과가 나타났으며 주방식 지하공간 시공 완료 후 지표면 공원부지 형성 및 구조물에 의한 상재 하중 재하단계로 인해 최종단계에서 소폭 상승하는 결과가 나타났다.

시공단계에 따른 결과값 중 특정 시공단계에서 결과값이 급격히 상승하는 부분이 모든 지보패턴에서 나타났다. 해당 결과값은 암주 형성을 위한 횡방향 굴착 시(Fig. 3의 (2), (3)) 발생하였다. 이는 암주 형성을 위한 횡방향 굴착 시 지지체 역할을 하는 암주와 암주 사이 암반을 제거하며 지하공간에 응력이 집중되어 발생한 것으로 판단된다(Esterhuizen et al., 2007). 이를 통해 주방식 지하공간의 시공과정 중 암주를 형성하기 위한 횡방향 굴착 시 보다 정밀한 시공이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 주방식 지하공간 공법에 대한 수치해석연구를 수행하고 지반조건을 고려한 지보패턴을 선정하여 주방식 지하공간 공법의 안정성을 검토하고 고찰하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 본 연구에서 이용한 수치해석모델은 종방향 굴착뿐만 아니라 횡방향 굴착이 존재하는 주방식 지하공간의 시공단계를 모사한 3차원 수치해석모델로 이를 이용하여 지보패턴 별 안정성 검토를 수행할 수 있다.
2. 시공단계에 따른 안정성 검토결과, 굴착이 진행됨에 따라 천단변위, 내공변위, 지보재 응력 등이 점차 증가하는 결과가 나타났으며 그 중 암주를 형성하기 위한 횡방향 굴착 시에 변위가 급격히 증가하는 결과가 나타나는 것을 확인하였다. 따라서, 실제 시공 시 암주 형성을 위한 굴착단계에서 정밀한 시공이 필요할 것으로 판단된다.
3. 주방식 지하공간이 시공되는 현장의 지반조사결과를 이용해 선정된 지보패턴은 검토결과, 안정한 것으로 확인되었으며 해당 지보패턴은 주방식 지하공간의 설계지보패턴으로 적절한 것으로 판단된다.
4. 주방식 지하공간은 암반의 강도를 이용하여 상부 하중을 지지하는 무지보 공법 중 하나로써 암반상태와 지반 특성치에 밀접한 연관성을 갖는다. 따라서, 추후 적용구간의 현장 암반상태(암종, 암반 내 구조대 분포, 불연속면 방향성 및 암반분류 등)에 따른 암주와 지하공간의 형상 설계에 대한 안정화 대책은 현재 적용되어 운영 중인 현장의 많은 데이터와 실제 시공사례를 통한 상세연구가 필요할 것으로 판단된다.

저자 기여도

강병윤은 연구 개념 및 설계를 하였고, 방상혁은 원고 검토를 하였고, 노충기는 데이터 분석과 원고 검토를 하였고, 김동관은 데이터 해석, 수집, 원고 작성을 수행하였다.

References

1. Esterhuizen, G.S., Dolinar, D.R., Ellenberger, J.L. (2007), "Observations and evaluation of floor benching effects on pillar stability in U.S. limestone mines", Proceedings of the 1st Canada - U.S. Rock Mechanics Symposium, Vancouver, Canada, pp. 1-7.
2. KICT (2017), Development of key excavation solutions for expandable urban underground space (V), KICT 2017-178, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, pp. 229-230.
3. KORES (2019), Development of optimal design standards for the unsupported limestone mine in Korea, Korea Resources Corporation, pp. 30.
4. Lee, C., Chang, S.H., Shin, H.S. (2013), "A numerical study on evaluation of unsupported pillar strength in the room and pillar method", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 15, No. 4, pp. 443-453.
5. Lee, C., Hwang, J., Kim, E., Chang, S.H. (2014a), "Consideration on design procedure of room-and-pillar underground structure part I: parametric study", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 16, No. 5, pp. 487-495.
6. 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", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 16, No. 5, pp. 497-506.
7. Okubo, S., Yamatomi, J. (2009), "Underground mining methods and equipment", Civil Engineering - Volume II, EOLSS Publications Co., Ltd., Oxford, United Kingdom, pp. 171-193.