

지류론과 암주 강도의 추정에 의한 주방식 지하구조의 무지보 암주 설계

장수호, 이철호, 최순욱*, 허진석, 황제돈

Design of Unsupported Rock Pillars in a Room-and-Pillar Underground Structure by the Tributary Area Method and the Pillar Strength Estimation

Soo-Ho Chang, Chulho Lee, Soon-Wook Choi*, Jinsuk Hur, Jedon Hwang

Abstract Room-and-pillar mining method is one of the most popular underground mining method in the world. If the room-and-pillar mining method is able to be adopted in civil works, it would be highly probable to reduce underground construction costs and to expand a underground structure in use. Therefore, this study aims to analyze the design procedure of unsupported rock pillars which are indispensable to ensure the stability of a room-and-pillar underground structure. Parametric studies on their key design parameters are also carried out for 125 different kinds of design conditions. From the study, the width of a rock pillar is found to show a linear relationship with its corresponding safety factor. The safety factor of a unsupported rock pillar decreased drastically like a negative exponential function as the ratio of room width to pillar width increases in the same rock strength condition. Based on the parametric studies, a design chart to simply evaluate the geometric design parameters of a unsupported rock pillar satisfying a design safety factor is also proposed in this study.

Key words Room-and-pillar structure, Tributary Area Method, Pillar strength, Pillar stress, Safety factor

초 록 무지보 암주에 의해 채굴적의 안정성을 확보하는 주방식 채광법은 전 세계적으로 가장 일반적이며 널리 활용되고 있는 지하 채광법이다. 경제적이고 운용 중에 확장이 가능한 주방식 채광법을 지하공간 건설에 적용하기 위한 기초 연구로서, 본 연구에서는 주방식 지하구조에서 가장 중요한 무지보 암주의 설계방법을 고찰하고 주요 설계변수들에 대한 총 125개 조건의 변수해석을 실시하였다. 이상의 연구결과, 암주의 폭과 암주의 안전율은 매우 뚜렷한 선형관계를 보이며, 암석의 압축강도가 동일할 경우에는 공간 폭과 암주 폭의 비율이 증가할수록 무지보 암주의 안전율이 음지수 함수 형태로 감소하는 것으로 나타났다. 또한 변수해석 결과들을 바탕으로, 암석의 압축강도와 설계 안전율에 따라 무지보 암주의 설계 형상변수를 쉽게 추정할 수 있는 도표를 제시하였다.

핵심어 주방식 구조, 지류론, 암주 강도, 암주 응력, 안전율

1. 서 론

주방식 채광법(room-and-pillar mining method)은 무

지보 채광법(unsupported method)의 일종으로서, 인공적인 지보재를 사용하지 않고 암주(rock pillar)만으로 지하 채굴적의 안정성을 확보할 수 있는 경우에 적용된다. 이론적으로는 암주 폭과 공간(room) 폭의 비율을 조절하면 모든 종류의 암반 조건에 주방식 채광법을 적용할 수 있지만, 실제로는 채굴 생산성이 높은 조건에 적용되고 있다(Hartman and Mutmansky, 2002).

주방식 채광법이 석탄, 구리, 암염 등 다양한 광물자원의 채굴을 위해 현재까지 150년 이상 적용되고 있다는 점을 고려한다면, 주방식 채광법은 경제적이고 안전

Received: Oct. 1, 2014

Revised: Oct. 14, 2014

Accepted: Oct. 17, 2014

***Corresponding Author:** Soon-Wook Choi

(Tel) +82319100243, (Fax) +82319100561

(E-Mail) soonugi@kict.re.kr

Korea Institute of Construction Technology Ilsanseo-gu,
Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

하며 전 세계적으로 가장 널리 사용되고 있는 채광법이다(Bullock, 2011). 특히, 미국 지하 광산들의 거의 80%와 전 세계 지하 석탄광산의 60% 이상이 주방식 채광법으로 채굴이 이루어지고 있다(Hartman and Mutmansky, 2002; Tien, 2011).

하지만, 미국 NIOSH(National Institute for Occupational safety and Health)에서 제시하고 있는 압주 설계 가이드라인(Esterhuizen et al., 2011) 등의 자료를 제외하고는, 아직까지 체계적인 압주 강도 산정과 그에 따른 압주 설계방법이 명확히 확립되지 않은 상황이다. 특히, 대부분의 주방식 광산에서 압주 설계들이 경험적으로 이루어지고 있어, 설계단계에서 명확하고 합리적인 설계물량과 공사비 산출이 요구되는 토목구조물에 주방식 채광법을 적용하기가 어려운 상황이다. 최근 들어서, 주방식 채광법을 지하 토목구조물 건설에 적용하기 위한 연구들이 이루어지고 있다(Lee et al., 2013). 특히, 동일한 조건에서 종래의 2아치 공법 등과 비교할 때 상대적으로 경제성이 우수하며, 굴착 공간이 커질수록 경제성이 크게 향상되는 것으로 보고되었다(Lee et al., 2013c). 하지만 아직까지 구체적인 주방식 지하구조물의 설계패턴이 제시되지 못하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 압주에 작용하는 응력을 산정하기 위한 지류론(tributary area theory)과 현재까지 문헌에 제시된 압주 강도 산정식들을 활용하여, 압반조건에 따른 압주의 형상 치수, 공간의 폭 등에 대한 변수해석을 실시하고 실제 도심지의 지하공간 설계에 활용할 수 있는 무지보 압주의 설계 방안을 제시하고자 하였다.

2. 주방식 지하구조와 무지보 압주의 설계방법

2.1 주방식 채광법의 개요

주방식 채광법은 이상적으로는 횡방향으로 규모가 크며 두께가 일정한 광체나 암층에 적용되지만, 미국 미주리의 Old Lead Belt의 경우와 같이 광체 두께가 3~91 m까지 변화하는 조건에서도 적용이 가능하다(Bullock, 2011).

주방식 광산의 굴착은 천공-발파법이나 기계 굴착장비인 컨티뉴어스 마이너(continuous miner)에 의해 이루어지는데, 암반 강도가 크지 않은 경우에는 대부분 컨티뉴어스 마이너에 의한 굴착이 이루어진다. 예를 들어, 미국의 경우에는 전체 석탄광 가운데 약 0.6%에서만 천공-발파법으로 굴착이 이루어지고 있다(Tien, 2011).

주방식 지하구조에서 압주의 크기는 고정된 것이 아니라, 공간 상부의 상재하중으로 인한 압주 응력, 광체 채굴로 인해 압주에 발생하는 추가적인 응력, 그리고

암반의 초기응력에 의한 압축응력에 버틸 수 있도록 압주를 설계해야 한다. 주방식 채광법에서는 인공적인 지보재를 사용하지 않는 것이 원칙이나, 주방식 지하구조에서는 천정부의 암반 강도 확보가 중요하기 때문에 1940년대말에서 1950년대에 개발된 루프볼트(roof bolt)가 일반적으로 적용되고 있다. 이외에도 매우 불리한 조건에서 숏크리트, 철망, 목재기둥, 루프매트(roof mat) 등이 적용되기도 하나 보조적인 역할에 불과하다(Tien, 2011).

주방식 채광법에서 사용되는 압주는 실제 굴착 공간을 지지하는 패널압주(panel pillar)와 패널압주들 외부에 위치하는 대규모의 장벽압주(barrier pillar)로 구분된다. 현대식 주방식 광산에서 이들 압주들은 일정한 패턴으로 직교 형태로 배열되는 것이 일반적이다(Fig. 1). 특히, 기본적으로 패널압주들이 모두 파괴되거나 회수 채굴(retreat mining)될 때를 대비하여, 장벽압주가 상재 하중을 모두 지지하는 개념으로 설계한다(Bullock, 2011).

2.2 무지보 압주의 설계방법

무지보 압주의 설계방법은 기본적으로 압주의 크기와 형상에 따라 압주에 작용하는 압축응력과 압주의 강도를 비교하여 압주의 안정성을 평가하는 과정으로 구성된다. 이와 같이 무지보 압주로 구성되는 주방식 지하구조의 주요 설계항목으로는 공간의 폭, 패널압주의 폭, 패널의 크기 및 장벽필라의 폭이 포함된다(Bullock, 2011).

무지보 압주를 설계하기 위한 첫 번째 단계로서, 지류론에 의해 압주에 작용하는 평균 압축응력을 추정한다. 지류론에 근거한 압주의 응력 산정 방식은 모든 상재하중을 압주가 지지한다는 가정을 배포하며 휨응력이나 아칭효과는 고려되지 않는다(Hoek and Brown, 1980; Lee et al., 2013a). 또한 지류론에서는 채굴면적이 넓고 모든 압주들이 동일한 크기를 갖는 것으로 가정하며 압주 주변 암반의 변형 특성을 고려하지 못한다(Bullock, 2011).

Fig. 2와 같은 주방식 구조에서 지류론에 의한 평균 압주 응력의 추정식은 다음의 식 (1)과 같다(Pariseau, 2007).

$$\sigma_{pa} = \sigma_z \left(\frac{W_p + W_o}{W_p} \right)^2 \quad (1)$$

여기서, W_p 는 압주의 폭, W_o 는 공간의 폭, 그리고 σ_z 는 현지 수직응력이다.

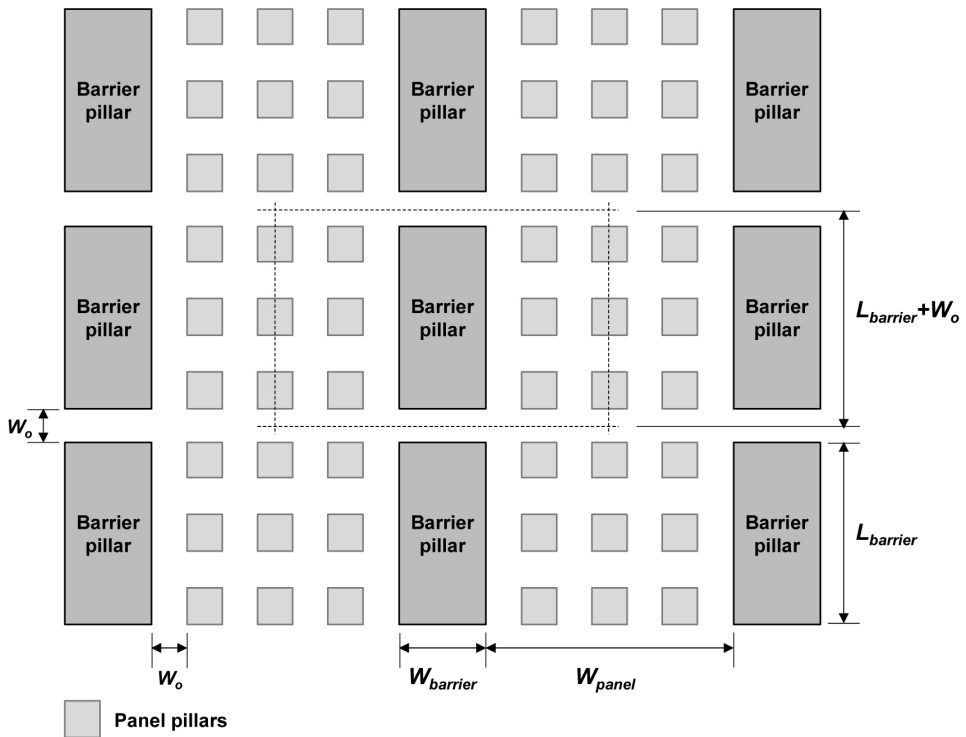


Fig. 1. An example of the array of panel pillars and barrier pillars in a room-and-pillar mine

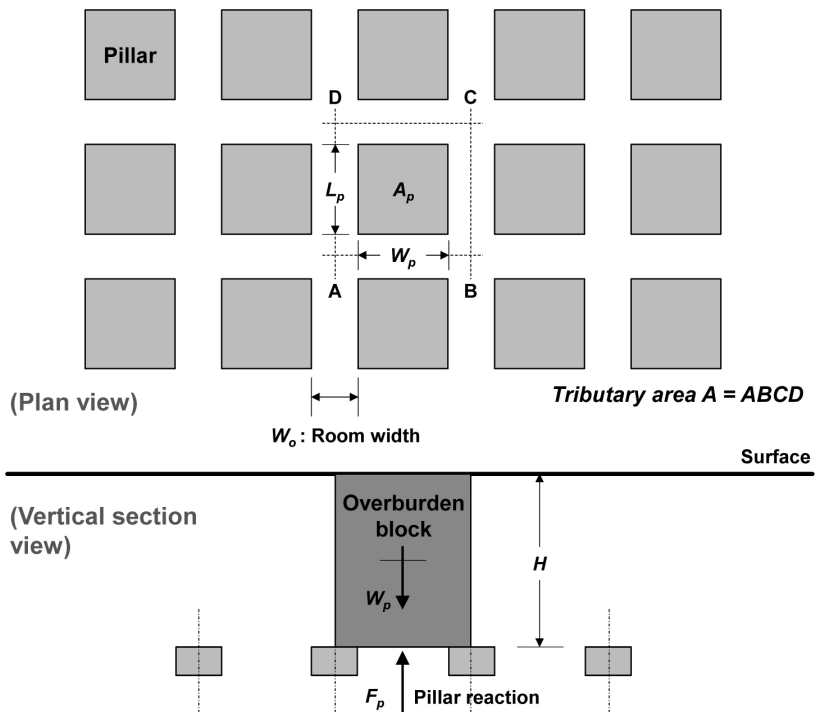


Fig. 2. Concept of a tributary area in an array of pillars and rooms

두 번째로 암주 강도를 평가하여야 하는데 이때 암주의 크기효과(size effect)와 형상효과(shape effect)를 고려해야 한다. Farmer(1985)는 취성파괴가 발생할 때 변형률에너지는 암석에 따라 일정한 파괴표면에너지(fracture surface energy)로 변환된다는 에너지 보존 개념에 근거하여 다음의 식 (2)~(5)의 과정을 거쳐 식 (6)과 같이 크기효과를 고려한 암주의 강도 산정식을 제시하였다.

$$SED \cdot V = FE \cdot A \quad (2)$$

$$SED \cdot \frac{V}{A} = SED \cdot L = FE = \text{constant} \quad (3)$$

여기서, SED 는 변형률에너지밀도(strain energy density), V 는 체적, FE 는 재료상수인 파괴표면에너지, A 는 파괴에너지면적(fracture energy area) 그리고 L 은 암석 시험편의 특성치수(characteristic dimension) 또는 길이이다.

실험실 규모의 파괴가 실제 규모의 암주 파괴와 역학적으로 유사하다고 가정하면 식 (3)은 식 (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$SED_s \cdot L_s = SED_p \cdot L_p \quad (4)$$

여기서, s 는 실험실 규모 시험편을 나타내는 아래첨자이며 p 는 실제 규모의 암주를 나타내는 아래첨자를 의미한다.

파괴 시의 변형률에너지밀도는 파괴응력의 제곱과 비례하기 때문에 식 (4)를 식 (5) 및 (6)과 같이 변환할 수 있다.

$$\sigma_s^2 \cdot L_s = \sigma_p^2 \cdot L_p \quad (5)$$

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_p} = \left(\frac{L_s}{L_p}\right)^{1/2} = \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^{1/6} = \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^{0.17} \quad (6)$$

여기서 σ_s 는 실제 규모의 암주 강도, σ_p 는 실험실 규모의 시험체 강도로서 암석의 일축압축강도(σ_c)를 의미하며, V 는 체적으로서 L^3 에 비례한다.

이상과 같이 실제 규모의 암주 강도를 산정한 후, 형상효과를 고려한 암주 강도를 산정하기 위해 다음의 식 (7)과 같은 변환식을 사용할 수 있다(Mark, 1999).

$$\sigma_p = \sigma_s \left(0.64 + 0.54 \frac{W_p}{H} - 0.18 \frac{W_p^2}{H \cdot L_p} \right) \quad (7)$$

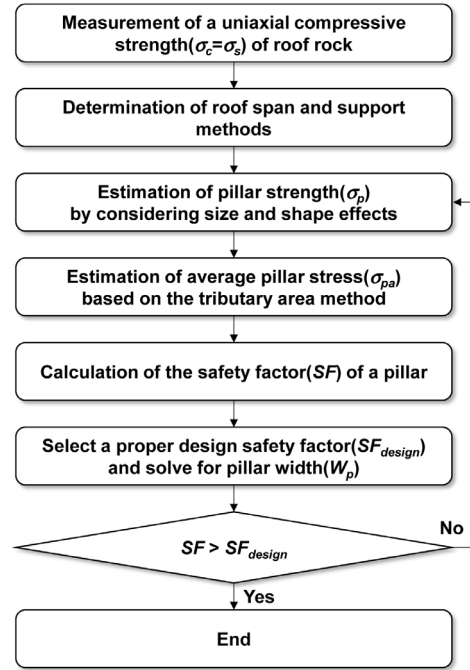


Fig. 3. Proposed design procedures for unsupported rock pillars in a room-and-pillar structure

여기서, L_p 는 암주의 길이 그리고 H 는 암주와 공간의 높이이다.

마지막으로 식 (7)의 암주 강도와 지류론에 의한 식 (1)의 암주 압축응력의 비율을 안전율(safety factor, SF)로 정의하여 암주의 안정성을 평가하게 된다.

$$SF = \frac{\sigma_p}{\sigma_{pa}} \quad (8)$$

이상과 같이 지류론에 기반하여 도출된 암주의 안정성 평가방법과 Bieniawski(1987)가 제시한 8개 항목의 암주 설계단계들을 조합하여, 본 연구에서 정리한 무지보 암주의 설계절차는 다음의 Fig. 3과 같다.

3. 설계검토 조건 및 결과

3.1 설계검토 조건

본 연구에서는 도심지에서 지하공간 건설을 위한 주방식 공법의 적용성을 평가하기 위하여, 검토대상 심도를 첫 번째로 검토하였다. 대표적으로 서울시 지하철 1~3기에 건설된 지하철 정거장의 심도를 분석한 결과, 지하철 이용자의 접근 용이성 등을 고려하여 지하철 정

Table 1. Depths of Seoul subway stations (ESCO Consultant, 2014)

Construction stage	1 st stage (Subway Line No. 1~4)	2 nd stage (Subway Line No. 5~8)	3 rd stage (Subway Line No. 9)
Station depth (m)	7.2 ~ 29.1	9.9 ~ 56.6	11.6 ~ 36.9

Table 2. Heights of room and pillar with different underground uses (ESCO Consultant, 2014)

Use	Residence or office	Warehouse
Room and pillar height (H)	3 m	6 m

거장의 약 90% 이상이 지표와 지하 30 m 사이의 심도에 건설되었다(Table 1). 따라서 본 연구에서는 기존의 지하 시설물 및 지하철과의 간섭을 최소화할 수 있는 심도로서 30 m를 선정하여 해석에 적용하였다.

또한 설계 검토대상 공간의 높이, 즉 암주의 높이를 검토하였다. 주방식 지하구조의 가장 큰 장점은 운용중에도 지속적인 공간 확장이 가능하기 때문에, 선형 지하구조물인 각종 교통 터널이나 유틸리티 터널에 적용하기 보다는 사람이 활동하는 각종 주거 또는 사무용 공간이나 물류저장, 데이터병커(data banker)등의 창고형 공간에의 적용성이 높을 것으로 판단하였다. 따라서 본 연구에서는 국내 외 사례들을 참고하여 지하구조물의 용도에 따라 요구되는 공간의 높이를 Table 2와 같이 분석하였다. 이 가운데 본 연구에서는 창고형 공간의 높이인 6 m를 설계 검토대상 암주의 높이로 설정하여 해석을 수행하였다. 실제로 주방식 채광법으로 채굴이 이루어진 석회석 폐광산을 세계 최대의 복합 상업 지하공간으로 활용하고 있는 미국 켄자스시티의 서브트로폴리스(Subtropolis)의 경우에도 공간의 높이, 즉 암주의 높이가 5 m이다(Carmody and Sterling, 1993).

앞선 2.2절에서 살펴본 바와 같이, 크기효과와 형상효과를 고려한 무지보 암주의 강도를 산정하기 위해서는 암석의 일축압축강도(uniaxial compressive strength, $\sigma_c = \sigma_s$)를 산정해야 하는데(식 (6) 참조), 본 연구에서는 다양한 암석의 강도 조건을 고려하기 위하여 암석의 일축압축강도를 40, 70, 100, 130 및 160 MPa의 5가지 조건으로 가정하여 해석을 실시하였다.

또한 역시 2.2절에서 살펴본 바와 같이, 암주에 작용하는 평균 압축응력을 추정하기 위해 적용되는 지류론에서는 모든 암주들이 동일한 크기를 가지는 것으로 가정하기 때문에, 본 연구에서는 모든 암주들이 동일한 정사각형 단면을 가지는 것으로 가정하여 암주의 폭(W_p)과 암주의 길이(L_p)를 동일하게 설정하였다(Fig. 2 참조). 또한 암주들이 일정한 대형 형태로 배열되는 것으로 가정하였기 때문에, 패널암주의 개수와 배열은 암

주의 안전율 산정에 영향을 미치지 않는다.

본 연구에서는 회수채굴(retreat mining)을 고려하지 않고 모든 주방식 공간을 패널암주들이 지지하는 것으로 고려하여 장벽암주의 설계 검토는 제외하였다. 대신, 각 암석의 일축압축강도 조건별로 공간의 폭(W_c)을 6, 12, 18, 24 및 30 m로 달리하며 검토를 실시하였으며, 암주의 폭(W_p 및 L_p) 역시 3, 6, 9, 12 및 18 m의 5가지 조건으로 고려하였다.

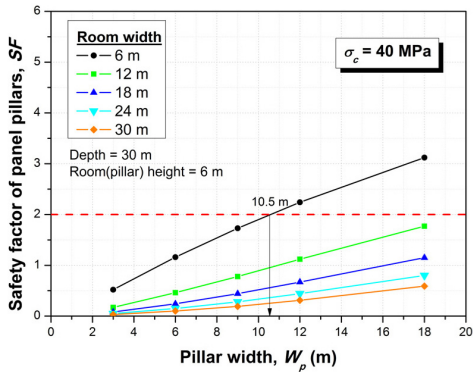
이때 무지보 암주의 안정성을 평가하기 위한 척도로써 Bullock(2011)과 미국 NIOSH의 가이드라인(Esterhuizen et al., 2011)에서 암주의 최소 안전율을 각각 2.0 및 1.8로 제시하고 있다는 점을 고려하여, 본 연구에서는 보수적인 평가를 위하여 무지보 암주의 최소 안전율을 2.0으로 적용하였다.

이상과 같이 본 연구에서는 검토 대상 심도를 30 m로 설정하고 암석의 일축압축강도 5가지 조건, 공간의 폭 5가지 조건 및 암주의 폭 5가지 조건의 총 125개 조건에 대해 무지보 암주의 최소 안전율로서 2.0을 적용하여 설계검토를 실시하였다.

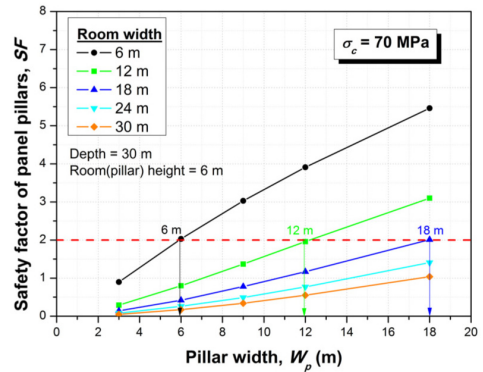
3.2 검토결과

3.1절에서 설정한 총 125개 조건에 대해 암주와 공간의 폭 및 암석의 일축압축강도에 따라 식 (8)로 정의된 암주의 안전율을 산정하면 다음의 Fig. 4와 같다. 암석의 일축압축강도와 공간의 폭이 일정한 조건에서, 암주의 폭이 증가할수록 해당 암주의 안전율은 거의 선형적으로 증가하는 것을 파악할 수 있다. 또한 본 연구에서 적용한 무지보 암주의 최소 안전율인 2를 적용한 결과, 암석의 일축압축강도가 70 MPa일 경우에 안전율 2를 만족하는 무지보 암주의 폭과 공간의 폭의 비율이 1:1이 됨을 확인할 수 있었다(Fig. 4b). 반면, 일축압축강도가 70 MPa를 초과하게 되면, 암주의 폭보다 공간의 폭을 크게 해도 2이상의 안전율을 확보할 수 있는 것으로 나타났다(Fig. 4c~4e).

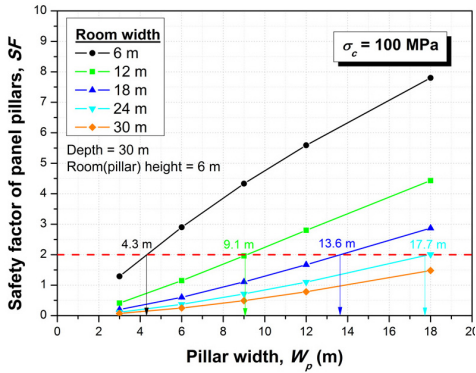
이상과 같이 Fig. 4로부터 얻어진 최소 안전율 2를 만



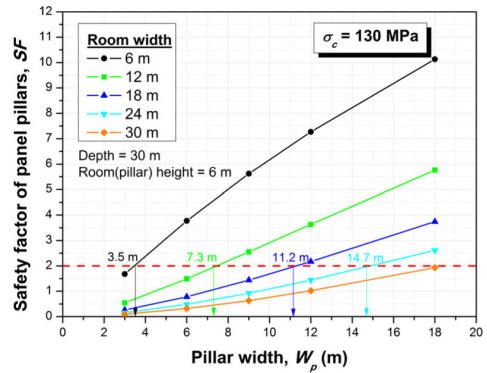
(a) $\sigma_c = 40$ MPa



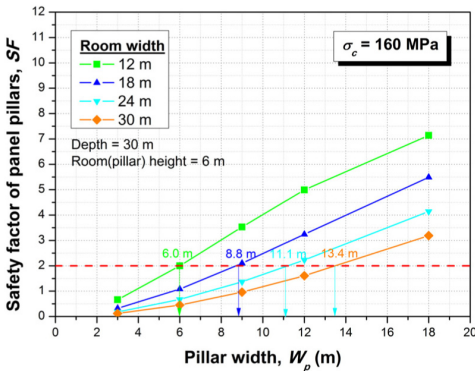
(b) $\sigma_c = 70$ MPa



(c) $\sigma_c = 100$ MPa



(d) $\sigma_c = 130$ MPa



(e) $\sigma_c = 160$ MPa

Fig. 4. Relationships between pillar width and its corresponding safety factor at different rock strength and room width conditions

족하는 공간의 폭(W_o)과 무지보 암주 폭(W_p)의 비율의 평균과 표준편차를 암석의 일축압축강도(σ_c)의 변화에 따라 도시하면 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 확인할 수 있는 바와 같이, 동일한 일축압축강도 조건에서 안전율 2

를 만족하는 공간과 암주 폭의 비율(W_o/W_p)은 편차가 크지 않고 거의 동일하게 나타났다. 또한 암석의 일축 압축강도와 안전율 2를 만족하는 공간과 암주 폭의 비율은 매우 뚜렷한 선형 관계를 나타내었다. 이상의 관

Table 3. Regression functions for safety factors of unsupported pillars with different rock strengths

Uniaxial compressive strength of rock (σ_c)	Regression function	Coefficient of determination (R^2)
40 MPa	$SF = 1.166 \left(\frac{W_o}{W_p} \right)^{-0.906}$	> 0.99
70 MPa	$SF = 1.947 \left(\frac{W_o}{W_p} \right)^{-1.134}$	
100 MPa	$SF = 2.857 \left(\frac{W_o}{W_p} \right)^{-1.295}$	
130 MPa	$SF = 3.821 \left(\frac{W_o}{W_p} \right)^{-1.364}$	
160 MPa	$SF = 6.445 \left(\frac{W_o}{W_p} \right)^{-1.579}$	

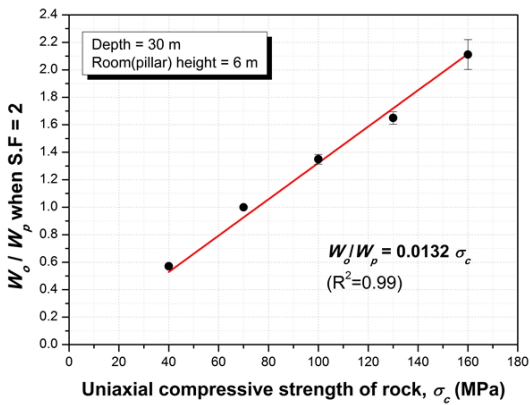


Fig. 5. Linear relationship between rock strength and the ratio of room width to pillar width satisfying the minimum pillar safety factor of 2

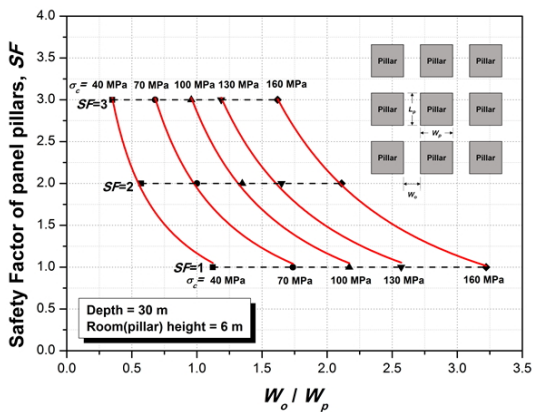


Fig. 6. Simple design chart for unsupported rock pillars with different rock strengths and pillar geometries

계로부터 본 연구에서 설정한 조건에 대해서는 암석의 일축압축강도로부터 최소 안전율 2를 만족할 수 있는 공간과 암주 폭의 비율을 쉽게 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

이와 유사하게 Fig. 4에서 얻어진 125개 조건의 결과들을 바탕으로, 암석의 일축압축강도와 무지보 암주의 안전율에 따른 공간 폭과 암주 폭의 비율(W_o/W_p)을 도시하면 다음의 Fig. 6과 같다. 암석의 일축압축강도가 동일할 경우, 공간 폭과 암주 폭의 비율이 증가할수록 무지보 암주의 안전율은 음지수 함수 형태로 감소함을 Fig. 6으로부터 확인할 수 있다. 특히, 동일한 암석 강도 조건에서 공간 폭과 암주 폭의 비율과 그에 따른 무지보 암주의 안전율의 상관관계들은 다음의 Table 3과 같이 멱함수(power function) 형태로 최적 근사할 수 있었다. 암석의 압축강도가 증가할수록 회귀분석된 멱함수의 비례상수와 음지수상수도 함께 커지는 것을 확인할 수 있다. 이상과 같이 지류론과 암주 강도 산정식에 의해 Fig. 6과 같이 본 연구에서 도출된 무지보 암주에 대한 간편 설계 도표를 활용하게 되면, 본 연구에서 가정한 심도와 공간의 높이 조건에서 암석의 강도 및 설계 안전율에 따른 무지보 암주의 설계 형상변수를 쉽게 추정할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 가정한 심도 및 공간의 높이 조건과 상이할 경우에도, 본 연구에서 제안한 절차에 의해 무지보 암주의 설계가 가능할 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는 무지보 채광법의 일종인 주방식 공법을 도심지 지하공간 건설에 활용하기 위한 기초 연구로써, 암주 작용 응력을 추정하기 위한 지류론과 암주의

크기 및 형상 효과를 고려한 압주의 강도 산정법에 근거하여 주방식 지하구조에서 구조적 안정성을 확보하는데 있어서 가장 중요한 무지보 압주의 설계 검토 연구를 실시하였다. 특히, 기존의 지하철 정거장 심도와 창고형 공간의 소요 높이를 고려하여, 암석의 강도, 공간과 압주의 폭 등 총 125개 조건에 대한 검토를 실시하였다.

이상의 연구결과, 압주의 폭이 증가할수록 압주의 안전율은 선형적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 암석의 일축압축강도가 70 MPa일 때 본 연구에서 설정한 최소 안전율 2를 만족하는 무지보 압주와 공간의 폭의 비율이 1:1이 되며 일축압축강도가 70 MPa 이상이면 압주의 폭보다 공간의 폭을 크게 해도 2이상의 안전율을 확보할 수 있었다.

또한 안전율이 동일한 조건에서, 암석의 압축강도 및 무지보 압주와 공간 폭의 비율은 매우 뚜렷한 선형관계를 나타내었으며, 암석의 압축강도가 동일할 경우에는 공간 폭과 압주 폭의 비율이 증가할수록 해당 무지보 압주의 안전율이 음지수 함수 형태로 감소하는 것으로 나타났다. 이상의 검토 결과를 바탕으로 본 연구에서 설정한 조건에서 암석의 압축강도와 설계 안전율에 따라 무지보 압주의 설계 형상변수를 쉽게 추정할 수 있는 설계 도표를 함께 제시하였다.

그러나 이상과 같은 해석으로부터 무지보 압주에 의해 전체 주방식 지하구조의 안정성을 확보할 수 있는 것으로 나타났을지라도, 자원개발용 광산보다는 높은 수준의 안정성과 사용성이 요구되는 토목 구조물에 주방식 공법을 적용하기 위해서는 무지보 압주뿐만 아니라 지하공간의 운용 중에도 높은 장기 안정성을 확보하기 위한 추가적인 지보재의 설치와 사용성을 향상시키기 위한 배수 시스템 등에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 주방식 구조에서는 압주들의 배열에 의해 전체적인 구조 안정성을 확보하는 개념이므로, 암반의 불확실성을 고려한 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation) 등과 같은 확률론적 해석(probabilistic analysis)을 통해 압주 안정성 평가결과의 신뢰성을 높이기 위한 추가적인 검토가 향후 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

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

Reference

1. Bieniawski, Z.T., 1987, *Strata Control in Mineral Engineering*. Rotterdam: A.A. Balkema.
2. Bullock, R.L., 2011, Room-and-Pillar Mining in Hard Rock, Chapter 13.1, *SME Mining Engineering Handbook*, P. Darling(ed), SME, 1327-1338.
3. Carmody, J. and R. Sterling, 1993, *Underground Space Design - A guide to Subsurface Utilization and Design for People in Underground Spaces*, International Thomson Publishing company, 110p.
4. Esco Consultant & Engineers Co., Ltd., 2014, Research on the optimum design patterns of room-and-pillar underground structures, Interim report, Submitted to Korea Institute of Civil engineering and building Technology (KICT), September 2014.
5. Esterhuizen, G.S., D.R. Dolinar, J.L. Ellenberger and L.J. Prosser, 2011, Pillar and roof span design guidelines for underground stone mines, Department Of Health And Human Services, NIOSH, IC9526, United States of America.
6. Farmer, I., 1985, *Coal Mine Structures*, Chapman and Hall, London.
7. Hartman, H.L. and J.M. Mutmansky, 2002, *Introductory mining engineering*, John Wiley & Sons, New Jersey, 323-332.
8. Hoek, E. and E.T. Brown, 1980, *Underground excavation in rock*, Institution of Mining and Metallurgy.
9. Lee, C., S.-H. Chang, and H.-S. Shin, 2013, 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, 443-453.
10. Lee, C., S.-H. Chang, and H.-S. Shin, 2013, 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, 585-597.
11. Lee, C., S.-H. Chang, S.-Y. Ahn and H.-S. Shin, 2013, A preliminary study on economical efficiency of a room-and-pillar excavation method in comparison with 2-arch tunnelling method, *J. of Korean Tunn. Undergr. Sp. Assoc.*, Vol. 15, No. 6, 599-612.
12. Mark, C., 1999, Empirical methods for coal pillar design, *Proceedings of the 2nd International Workshop on Coal Pillar Mechanics and Design*, Information Circular IC-9448, Pittsburgh, National Institute for Occupational Safety and Health. 145-154.
13. Pariseau, W.G., 2007, *Design Analysis in Rock Mechanics*, Taylor & Francis, Great Britain, 278-289.
14. Tien, J.C., 2011, Room-and-Pillar Mining in Coal, Chapter 13.2, *SME Mining Engineering Handbook*, P. Darling(ed), 1339-1346.



장수호

1996년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1998년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2002년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사

Tel: 031-910-0661
E-mail: sooho@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 GEO-인프라 연구실 연구위원



이철호

2005년 고려대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 공학사
2008년 고려대학교 대학원 건축사회환경공학부 공학석사
2012년 고려대학교 대학원 건축사회환경공학부 공학박사

Tel: 031-910-0437
E-mail: chlee@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 GEO-인프라 연구실 전임연구원



최순욱

1997년 건국대학교 공과대학 토목공학과 공학사
2004년 연세대학교 공학대학원 공학석사
2008년 연세대학교 대학원 토목환경공학과 박사과정 수료

Tel: 031-910-0243
E-mail: soonugi@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 GEO-인프라 연구실 전임연구원



허진석

1998년 영남대학교 공과대학 토목공학과 공학사
2000년 영남대학교 대학원 토목공학과 공학석사
2012년 고베대학교 대학원 시민공학과 공학박사

Tel: 031-467-4181
E-mail: jshur@escoeng.com
현재 (주)에스코컨설턴트 기술연구소장



황제돈

1980년 한양대학교 공과대학 토목공학과 공학사
2002년 한양대학교 공과대학원 공학석사

Tel: 031-467-4119
E-mail: hwangjd@escoeng.com
현재 (주)에스코컨설턴트 사장