

주방식 지하공간의 구조적 안정성 평가개념 정립에 관한 연구

이철호¹ · 장수호² · 신후성^{2*}

¹정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 전임연구원

²정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 연구위원

A study on conceptual evaluation of structural stability of room-and-pillar underground space

Chulho Lee, Soo-Ho Chang, Hyu-Soung Shin

¹Research Specialist, Geotechnical Engineering Research Division, SOC Research Institute, Korea Institute of Construction Technology

²Research Fellow, Geotechnical Engineering Research Division, SOC Research Institute, Korea Institute of Construction Technology

ABSTRACT: In this study, in order to evaluate stability of the room-and-pillar underground structure, a series of preliminary numerical analyses were performed. Design concept and procedure of an underground structure for obtaining a space are proposed, which should be different from structural design for the room-and-pillar in mine. With assumed material properties, a series of numerical analyses were performed by varying size ratios of room and pillar and then the failure modes and location at yielding initiation were investigated. From the results, relationship between the ratio of pillar width to the roof span (w/s) and overburden pressure at failure initiation shows a relatively linear relation, and the effect of w/s on structural stability is much more critical than the ratio of pillar width and height (w/H) which is a crucial parameter in design of the room-and-pillar mining. It means that roof tensile failure and shear failure at shoulder and pillar are necessary to be considered together for confirming overall structural stability of the room-and-pillar structure, rather than considering the pillar stability only in mining. Failure modes and location at failure initiation were varied with respect to the ratio of room and pillar widths. Therefore, it is necessary to simultaneously consider stability of both roof span and pillar for design of underground structure by the room-and-pillar method.

Keywords: Room and pillar method, Rock pillar, Roof span, Tension failure, Numerical analysis

초 록: 본 연구에서는 주방식 지하구조물의 안정성 검토방안을 마련하기 위해 암주와 천장부의 거동을 수치해석 방법으로 검토하였다. 또한, 기존 자원개발 분야에서 고려하는 주방식 공법의 설계 개념과는 달라져야 하는, 공간 확보차원에서의 합리적인 주방식 공법의 설계 절차 및 개념을 제시하였다. 주어진 지반 조건에서 암주의 형상비와 천장부의 길이에 따른 수치해석을 수행하였으며 초기 이완이 시작되는 시점에서의 파괴유형과 위치 변화를 검토하였다. 해석결과, 천장부 폭과 암주 폭과의 비(w/s)와 파괴시점의 상재하중 간의 관계는 선형관계를 보였으며, 천장부 폭과 암주 폭의 비가 주방식 채광 설계에서는 매우 중요한 설계인자로 다루어지는 암주의 폭과 높이 비(w/h)보다 구조물의 안정성 확보차원에서는 더욱 민감한 설계인자인 것으로 나타났다. 이는, 암주의 안정성만을 확보하는 차원에서 수행되는 주방식 채광 설계법과는 달리, 암주부와 함께 구조물 천장부 및 어깨부의 안정성까지도 함께 고려하여 지하 구조물의 안정성을 확보할 수 있는 구조물 설계가 되어야 함을 의미한다. 또한, 지하구조물의 형상에 따라 초기 이완대가 발생하는 위치와 전단 또는 인장파괴 등 파괴유형도 다르게 나타나, 주방식 지하구조물에 대한 설계는 상재하중에 따른 천장부와 암주의 안정성을 연계하여 수행하는 것이 필요하다.

주요어: 주방식 공법, 암주, 천장부, 인장 파괴, 수치해석

*Corresponding author: Hyu-Soung Shin

E-mail: hyushin@kict.re.kr

Received November 1, 2013; Revised November 7, 2013;

Accepted November 8, 2013

Copyright ©2013, Korean Tunnelling and Underground Space Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

주방식 공법(Room and pillar method)은 광산분야에서 시작된 공법으로서 수평 또는 거의 수평으로 매장되어 있는 광물을 채굴할 목적으로 적용되는 공법으로(Hartman and Mutmansky, 2002) 굴착면과 수직으로 굴착을 진행하고 광물의 매장 형태에 따라 일정 간격으로 방(room)을 형성하여 방과 방 사이에 암주(rock pillar)를 남겨 놓는 형태로 여러 곳의 작업장을 운영하는 방식을 일컫는다. 주방식 공법이 적용된 광산의 평면은 마치 체스판이나 바둑판식 도로의 모양을 띠게 되며 여러 굴착면에서 동시에 작업이 이루어지는 방식으로 진행되기 때문에 생산성과 효율성이 높은 공법으로 알려져 있다. 또한 채굴작업의 생산성과 효율을 높이기 위해 필요에 따라서 남겨 놓았던 암주를 채굴하기도 한다. 이러한 공법은 넓은 지역에 걸쳐 수평하게 분포하는 광물을 채굴하는 데에 이상적인 공법으로서 미국 등을 중심으로 사용되어 왔다.

미국 캔자스(Kansas)에서는 1960년대부터 기존의 석회암 광산을 주방식 공법을 활용하여 확장하고 물류센터, 우편물 집중국, 사무실 등의 대규모 상업 지하 공간(Subtropolis)으로 활용하고 있으며, Subtropolis에서 사용된 주방식 구조는 폭이 약 12 m인 직육면체 공간으로 구성되어 있고, 암주의 폭(w)과 높이(H)의 비는 1보다 크다(Carmody and Sterling, 1993; Lee et al., 2013). 이러한 주방식 지하 구조물에서의 암주는 자원개발 분야에서와는 성격이 다르다. 기존 자원개발에서의 주방식 채광은 채광기간동안 단기적인 암주의 안정성을 유지할 수 있을 정도의 암주 설계를 통해 최대한 많은 채광량을 확보하는 것이 주안점이다. 따라서, 초기 채광단계에서는 채광장비의 운용성 등을 고려하여 채굴장을 우선 결정하고, 채광작업 동안 채굴장의 안정성을 확보하기 위하여 충분한 안전율의 암주폭을 확보한다. 여기서, 불연속면 존재 등의 이유로 구조적으로 취약한 암주라도 암주부의 구조적

안정성을 확보를 위해 보강공법을 투입하지 않으며, 암주폭의 증가로 요구되는 구조적 안전율을 확보한다. 이는, 추후 1단계 채광작업이 완료되면 추가 암주부와 바닥부의 추가 채굴을 통해 추가 채광량을 확보할 수 있으므로, 암주부나 바닥부로부터 채집되는 광물의 오염을 최소화 하고 추가 채굴작업의 용이성을 감안한 것이다. 하지만, 공간 확보 측면에서의 주방식 굴착 공법은 중장기적인 공간 구조물의 안정성 확보에 더욱 주안점을 두어 천장부와 암주부가 연계된 하나의 통합 구조물로서 설계가 이루어 져야 한다. 여기서, 채광개념과는 달리 설계된 암주의 규격은 추후에 변경되지 않으며, 천장부 설계와 암주부 설계가 단계적으로 분리되지 수행되지 않으므로, 하나의 연계 구조체로써 구조적 안전성을 확보하는 설계가 이루어 져야 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.

기존 주방식 채광공법에서 암주의 설계는 암주의 강도와 암주의 응력상태를 고려하여 안전율을 산정하는 방법으로 진행되어 왔다. 특히, 암주의 안정성은 주방식 구조의 안정적인 유지에 필수적인 요소로 여겨진다(Esterhuizen et al., 2008). 주방식 채광공법에서 구조의 안정에 관한 연구는 주로 암주의 강도에 대한 연구가 대부분이며 이들 중 대다수는 암주의 강도를 경험식(Hedley & Grant, 1972; Hardy & Agapito, 1982; Kimmelman et al, 1984; Potvin et al, 1989; Krauland & Soder, 1987; Lunder & Pakalnis, 1997; Sheorey et al, 2000) 형태로 제시하고 있다. 하지만, 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)

본 논문에서는 기존 채광개념의 주방식 구조물의 설계방법과 과정을 정리하여 제시하였고, 공간확보 측면의 주방식 구조물의 설계개념과 과정을 설정하여 도식화 하고, 기존 채광개념과 비교 검토하였다. 이어, 채광개념의 설계법에서는 고려되지 않으며, 암반내 존재하는 불연속면의 영향이 없는 일체화 구조로써의 파괴 거동 특성을 분석하기 위하여, 굴착 공간의 천장부와 암주부 규격이 연계된 수치해석 모델을 설정하여 매개변수 연구를 수행하였다. 이를 통해 상재하중의 증가에 따라 주방식 지하공간 구조물의 이완대 발생 시점의 위치 변화와 이완대 발달 추이를 분석하였다. 또한, 설정된 공간 및 암주 규격 비율 별로 구조물 안정성 확보 측면에서의 최대 상재하중 수준 변화 추이를 분석하였으며, 기존 채광설계법과 비교 검토를 통해 공간개념의 구조물 안정성 확보를 위한 설계개념과의 차이를 제시하였다.

2. 기존 안정성 해석 방법

2.1 암주의 강도 및 안전율

기존 암주의 안정성 해석의 방법은 지류론(tributary theory)에 근거하여 산정된 상재하중과 암주의 강도사이의 관계를 도출하는 방식이다(Lee et al., 2013). 지류론에 근거한 암주의 응력 산정 방식은 모든 상재하중을 암주가 지지한다는 가정을 내포하며 휨응력이나 아칭효과는 고려되지 않는다(Hoek and Brown, 1980; Shin & Kim, 2010). 따라서, 암주에 작용하는 응력(σ_p)은 정사각형 굴착공간(room)과 암주 조건에서 상부의 토피고(rock cover, h)를 고려하여 다음과 같이 산정될 수 있다.

$$\sigma_p = \gamma \times h \times \frac{A_t}{A_p} \quad (1)$$

여기서, h 는 굴착공간의 토피고(rock cover)이며, A_t 는

상부의 면적이고 A_p 는 암주의 면적이다. 암주의 강도는 암주를 형성하는 암석의 일축압축강도와 불연속면 조건 등을 감안하여 산정한다. 이때, 암주의 강도(S_p)는 경험적인 방법에 의해 추정되는 것이 일반적이다(Gonzalez-Nicieza et al., 2006). 암주의 강도는 기본적으로 암석의 일축압축강도에 근거하고 있으며 암주의 형상비에 따라 다르게 산정된다. 이와 관련된 대표적인 경험식들을 Table 1과 Fig. 1에 정리하였다. 기존의 경험식들에서는 암반의 강도(rock mass strength, S_o)를 무결암(intact rock)의 일축압축강도에서 약 40~60% 정도 감소하여 고려하고 있다(Table 1 참조). 이는 암반에 존재하는 절리 등의 불연속면과 형상비에 따른 강도 저하를 간접적으로 고려하기 위한 것으로서 연구마다 저감계수를 다르게 제시하고 있다.

미국 NIOSH (National Institute for Occupational safety and Health) 가이드라인(Esterhuizen et al., 2008a; Esterhuizen et al., 2011)에서는 현장 계측 자료를 토대로 암주에 존재하는 절리와 형상비를 고려한 암주의 강도 추정식을 다음의 식 (2)와 같이 제시하고 있다.

$$S_p = 0.65 \times \sigma_c \times LDF \times \frac{w^{0.30}}{H^{0.59}} \quad (2)$$

여기서, LDF (Large discontinuity factor)는 불연속면 조건에 따른 강도 저감계수로서 불연속면의 상태에 따라 최소 0.06에서 최대 1까지의 값을 갖는다. NIOSH 가이드 라인에서도 무결암의 일축압축 강도를 기준으로 65% 저감시켜 고려하고 있으며, 추가적으로 불연속면 계수를 도입하고 있다는 점이 차이점이라고 할 수 있다. 이러한 경험적인 방법 외에도 수치해석 방법을 사용하여 형상비에 따른 암주의 강도를 추정할 수 있는 방법을 제시한 연구도 소개된 바 있다(Esterhuizen, 2006; Mortazavi et al., 2009). 이러한 과정으로 암주에 작용하는 응력과 암주의 강도가 산정되면 암주의 안전율(FOS)은 다음과 같이 계산된다.

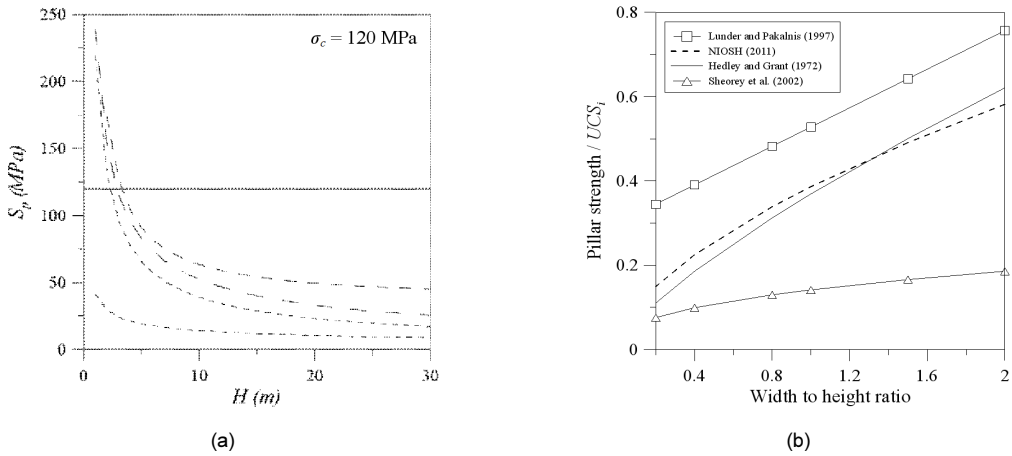


Fig. 1. Comparison of the pillar strengths estimated by four-different kinds of empirical equations (a) and Relationship between w/H ratio and pillar strength (b) (Lee et al., 2013)

Table 1. Empirical equations for the pillar strength dependent upon the ratio of its width to height (Lee et al., 2013)

Reference	Pillar strength (S_p)	Rock mass strength (S_o)	Note
Hedley and Grant (1972)	$S_p = S_o \frac{w^{0.5}}{H^{0.75}}$	0.578 σ_c	$\sigma_c = 230$ MPa
Kimmelman et al. (1984)	$S_p = S_o \frac{w^{0.46}}{H^{0.66}}$	0.691 σ_c	$\sigma_c = 94$ MPa
Lunder and Pakalnis (1997)	$S_p = S_o \left(0.680 + 0.520 \frac{w}{H} \right)$	0.440 σ_c	-
Sheorey et al. (2000)	$S_p = S_o \left(\frac{1}{H} \right)^{0.36} + \left(\frac{H}{250} + 1 \right) \left(\frac{w}{H} - 1 \right)$	0.270 σ_c	-

$$FOS = \frac{\sigma_p}{S_p} \quad (3)$$

2.2 천장부의 안정성

미국 NIOSH 가이드라인 에서는 천장부 너비(roof span)에 대해 여러 광산의 자료들을 수집한 사례 연구를 통해 적절한 설계 너비를 제시하고 있다. NIOSH 연구에서는 천장부 길이가 10~15 m 일 때, 대부분 안정된 시공이 가능했으며 이 이상을 시공하고자 할 경우에는 지보재를 고려해야 한다고 제시하고 있다 (Esterhuizen et al., 2011). Fig. 2는 NIOSH에서 제시 하는 안정성 차트로 미국의 사례 연구를 통해 제시된

결과이다.

다단 채광을 수행하는 주방식 광산의 경우에서 광산의 붕괴 사례를 통해 천장부의 두께를 제시하였는데, 천장부의 두께가 1.2 m 이하일 경우 대체적으로 보강이 필요했고 약 2 m 두께 이상에서 안정하게 유지되었다고 보고하였다(Esterhuizen et al., 2011). 여기서, 천장부의 두께는 천장부 상부의 불연속면을 고려하여 천장부가 연약대와 구분되어 일체거동을 보이는 두께를 말한다. 또한, 천장부에 작용하는 수평 응력이 천장부의 좌굴을 유발하여 파괴될 수 있기 때문에 주의가 요구된다고 보고하였다(Dolinar, 2003, Iannacchione et al., 2003)

이러한 경험적인 방법 외에도 천장부 안정성 해석

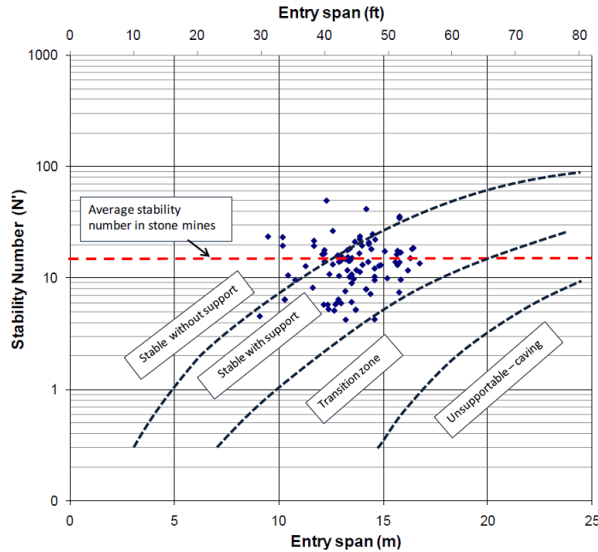


Fig. 2. Stability chart showing stone mine case histories (Esterhuizen et al., 2011)

은 천장부를 단순보로 간주하여 해석하는 방법을 사용하기도 한다(Obert and Duvall, 1967; Smith, 1990; Ömer et al., 2000; Swift and Reddish, 2002). 이때 천장부는 암주에 의해 양단이 고정된 보로 간주하며 천장부의 두께에 따라 천장부의 최대 응력을 산정하는 방식이다. 이러한 접근 방식은 천장부의 불연속면이 수평으로 존재하거나 록볼트를 고려할 때에도 안정성 해석이 가능한 장점이 있지만 천장부의 두께를 어느 정도로 고려해야 하는지에 대한 기술적인 검토가 요구되는 단점이 있다.

2.3 주방식 채광과 지하공간 설계 개념의 비교 검토

앞서 언급하였듯이 기존 주방식 채광에서의 주안점은 채굴을 통해 확보되는 광물에 있고, 공간확보 개념의 굴착은 굴착되어 남은 공간구조물의 중장기적인 안정성 확보에 있다. 그리고 채광개념에서의 암주의 역할은 채굴기간 동안 채광 중에 있는 채굴장의 일시적인 구조적 안정성을 확보하는 역할이며, 추후에 추가 채광량 확보를 위해 암주부의 추가 채굴이 가능하

다. 이에 반해 공간확보 측면에서의 암주의 역할은 요구되는 공용공간의 중장기적인 안정성을 확보하는 것이며, 불연속대의 내포와 중장기적인 내구성 저하 등을 고려하여 암주의 구조적 보강이 수행될 수 있고 암주 형성 이후에는 추가 굴착이 있을 수 없다.

기본적으로 상기 두 개념의 설계과정을 살펴보면, 기존 주방식 채광설계법에서는 Fig. 3(a)에서와 같이 우선 채광지역이 선정되면, 채광장비들의 운용 용이성 여부를 고려해 채굴장의 폭을 10~15 m 수준으로 선 결정하며(Esterhuizen et al., 2011), 장비 등과 연계된 채굴 조건을 고려해 1단계 채굴장 높이(암주의 높이)가 결정된다. 다음, 암주와 상관없이 주어질 토피 고로 부터의 상재하중 수준과 상부 암반의 층상구조 등의 구조 지질학적 측면 등을 고려해 천장부 보강 여부를 결정하고 채굴장의 안정성을 우선 확보한다. 다음, 작업 채굴장의 안정성 확보를 위한 암주의 구조적 안전율이 2.0 이상으로 충분히 주어지면(Esterhuizen et al., 2011) 기존의 주방식 채광설계법에 따라 취약한 불연속면 존재와 암주의 상하 끝단의 구속조건을 감안한 일련의 암석의 일축압축 강도의 보정과정을 거쳐 최종 암주의 폭을 결정할 수 있다. 이때, 모든 주방

식 채광법은 자연상태의 암주의 파괴와 구조적 안정성 확보를 위한 암주 설계에 집중되어 있으며, 지반등급 및 암주내 존재하는 불연속면의 존재가 개별적으로 암주의 안정성에 매우 민감하게 작용하므로 다양한 경험적인 설계정수들의 보정방법들이 제안되어 설계에 반영되고 있다.

이에 반해, 기존 터널 및 지하공간 구조물의 설계 개념에 기초하여 주방식 지하공간 설계과정을 설계해보면 Fig. 3(b)와 같다. 우선, 요구되는 공간수요와 행정적인 용지보상 등을 감안해 가용 공간범위가 주어지면, 주어진 토피고와 지반조건에 대하여 지하구조물의 파괴 지점 및 범위와 무관하게 전체 공간 구조계의 안정성을 확보하는 방향으로 설계되어야 한다. 이러한 과정상에서 공간차원에서의 천장부와 측벽 암주부의 안정성이 동시 연계 고려되어야 하고, 어느 부위이든 불안정성의 유발은 공간 구조의 불안정으로 판단된다. 이에 설계된 공간 및 암주 단면에 대하여 전체적인 구조 안정성을 검토하게 되고, 암주부를 포함해 검토된 불안전 영역과 수준을 감안하여 구조적

안정성 확보 차원에 부합되는 보강안을 설계하게 된다. 따라서, 공간차원의 단면설계는 주어진 조건에서 공간부와 암주부의 단면을 연계·검토하여 결정하는 것이 합리적이다.

본 논문에서는 이러한 개념상의 차이점을 도식적으로 보이기 위해, 다양한 공간부 및 암주부 폭 비율 조합에 대한 수치해석 모델을 설정하고, 주어진 토피고와 지반조건에 대해 초기 파괴지점 발생 위치와 이완대 발전 양상 추이변화를 분석하였다.

3. 수치해석적 검토

광산분야에 사용하던 주방식 공법의 안정성 해석과 설계는 암주의 강도 또는 천장부를 분리하여 고려하고 있다. 또한 암반의 불연속면과 절리 등을 고려하기 어렵기 때문에 대부분의 연구에서 경험적인 방법을 제시하고 있다. 지하구조물로서의 주방식 구조에서는 광산분야의 채광 효율성을 높이는 측면보다는 구조적인 안정성을 확보하여 공간활용에 문제가 없도록 해

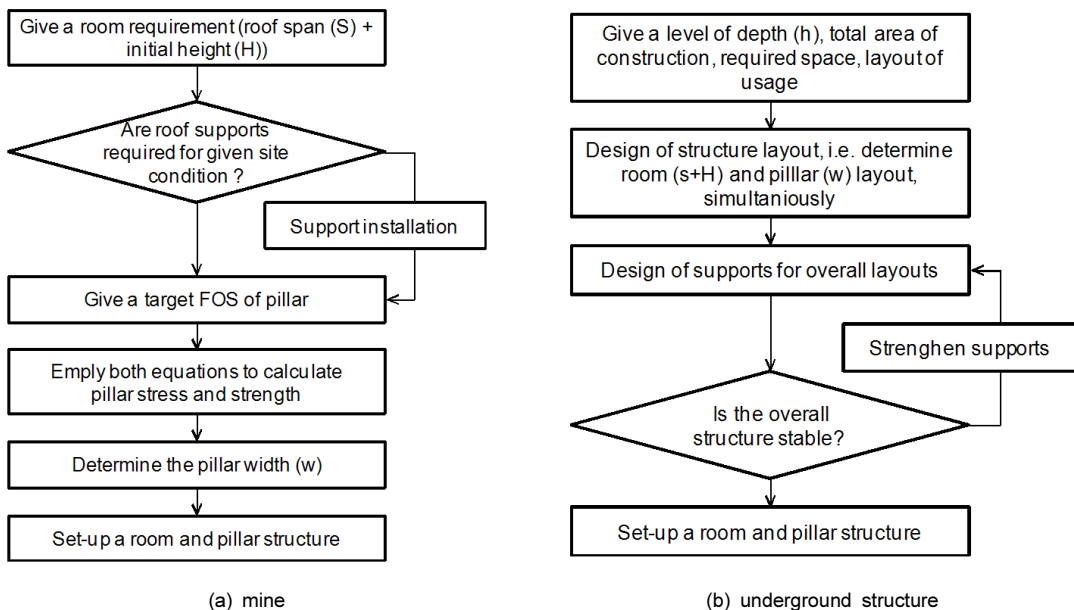


Fig. 3. Comparison of both design procedures for roon-and-pillar mining (a) and underground structure (b)

야하기 때문에 구조적인 안정성 해석이 우선되어야 한다고 볼 수 있다. 또한, 광산분야에서 암주는 임시 구조체의 성격을 갖고 있어서 지하구조물에서의 영구 구조체의 성격과 차별화된다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 2차원 수치해석 방법을 사용하여 주방식 구조에서 상재하중에 따른 암주와 천장부의 거동을 함께 분석하여 구조적인 안정성을 검토하고자 한다. 해석에 사용된 수치해석 프로그램은 지반의 비선형 거동을 모사할 수 있는 유한요소 프로그램인 MIDAS GTS를 이용하였다.

Esterhuizen et al. (2008b)는 기존 주방식 공법이 적용된 광산의 파괴 사례에 대해 보고하였으며 주요 파괴 위치가 천장부와 천단부에서 주로 발생한다고 보고하였다(Fig 4). 이런 사례들은 주방식 구조의 천정 중앙부와 암주 천단부, 암주 중앙면이 안정성의 주요 고려 대상임을 나타낸다. 본 수치해석 검토에서는 사전 검토단계로서 주방식 지하 구조체의 파괴 거동 특성을 파악하기 위하여 암반보강은 생략하였으며, 우선적으로 굴착장비의 굴착높이(H)를 고려하여 공간의 높이를 고정하고 굴착 공간폭 및 암주폭 조합 모델을 설정하여 지속적으로 증가하는 상재하중(토피고와 비례)에 대한 공동 주변의 초기 이완대 발생

지점 및 이완대 발전 추이 변화를 고찰하였다. 이어, 각 단면설계 조합에서의 파괴시점의 상재하중, 천장부 너비와와 암주 너비의 비율에 대해 예상되는 파괴 모드와 각 파괴모드별 허용 암주응력(상재하중 개념)을 평가하였다.

3.1 해석 조건

Fig. 5(a)는 연구에서 고려한 수치해석 모델의 모식도이고 Fig. 5(b)는 사용된 요소망의 예이다. 해석에 사용된 모델은 형상비 모델에 따라 응력집중이 예상되는 지점의 요소크기와 형태를 고려하여 1,041~25,521개의 절점과 10,800~25,200개의 사각형을 사용하여 유한요소망 해석모델을 구현하였다. 방의 너비(s)와 암주의 형상비(w/H)에 따른 구조물의 거동을 검토하기 위해, 암주의 높이는 장비 진입이 용이한 최소 높이로 5 m를 설정하였으며 방의 너비는 5, 7.5, 10 m를 적용하였다. 암주의 형상비 0.5, 1.0, 1.5에 따라 암주의 너비(w)는 2.5, 5, 7.5 m를 적용하여 각 형상 조건에 대해 총 9 가지의 경우를 검토하였다. 지반의 해석 범위는 암주면으로부터 상·하부 20 m로 설정하였으며(암주면 상단의 초기 수직응력 = 490



(a) Roof failure



(b) Failure at the pillar-roof contact

Fig. 4. Failure at the roof span and pillar-roof contact (Esterhuizen et al., 2008b)

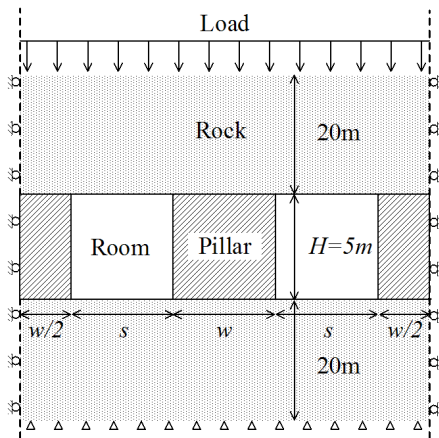
kPa), 측면은 연속된 주방식 구조를 모사하기 위해 대칭면이 되도록 모델링하고 상부에서 추가 상재하중이 가해지는 것으로 모사하였다. 암반의 조건은 Lee et al. (2013)에서 제시한 암반분류 가운데 2단계 암반 모델과 Mohr-Coulomb 파괴 기준을 적용하였다. 해석에 사용된 암반의 물성치는 Table 2에 정리하였다. 또한 암주 상부와 하부의 암반은 암주와 동일한 물성을 가지는 것으로 가정하였다.

본 연구에서는 횡방향으로 무한대로 존재하는 주방식 구조에 대한 해석으로 실제 3차원 구조에 대한 정밀한 해석 보다는 2차원 해석을 통해 초기 이완대가 발생하는 위치를 분석하기 위한 방법으로 본 해석을 수행하였다. 따라서, 해석에서 모사된 암주와 방의 길이는 무한대로서 상재하중에 의한 구조적인 거동을 분석하는 내용보다는 기본 구조에 대한 분석에 초점을 맞춘 것으로 해석내용이 제한된다. 또한, 해석의 편의를 위해 초기 지중에 의한 변형은 초기화 하였으

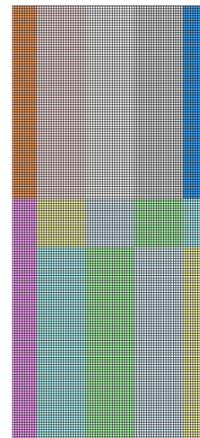
며 지중 적용 이후 방을 굴착하는 단계를 걸쳐 상재하중을 단계별로 적용하는 방법을 사용하였다. 해석 과정에서 주방식 구조에서 초기 이완대가 발생하는 지점 및 이완대 발전 추이 변화를 검토하여 주방식 구조의 형상에 따른 영향을 분석하였다.

3.2 해석 결과

Fig. 6은 대표적으로 암주 너비와 천장부의 비(w/s)가 1.0, 암주 형상비(w/H)는 1.0인 모델에서 천장부 인장 파괴 시점과 인장파괴가 상재하중의 단계에 따라 진행되는 모습을 나타낸다. 그림에서는 해석 요소의 소성 상태, 하중 상태 그리고 인장 파괴 여부를 나타냈다. Fig. 6(a)는 천장부에서 초기 이완대가 발생하는 시점의 상태이고 Fig. 6(b)와 (c)는 이완대가 전이된 상태에서 천단부에서 발생한 소성 영역이 암주 중앙부로 전이되는 모습(Fig. 6(d))이다. 해석 결과에



(a) Schematic diagram



(b) Example of a MIDAS grid

Fig. 5. Schematic diagram and example of a MIDAS grid used for modelling a room-and-pillar underground structure

Table 2. Material property of rock mass

Unit weight (kN/m ³)	Deformation Modulus (MPa)	Poisson's ratio	Cohesion (kPa)	Friction Angle (°)	Tensile strength (kPa)
24.5	9,000	0.22	1,700	36	1,100

서 나타나듯이, 본 연구에서 적용한 지반 물성 조건에서 지하구조의 형상에 따라 초기 이완대의 발생 위치가 천정 중앙부와 암주의 천단부에서 시작하여 이완대가 전이되는 모습을 볼 수 있다. 암주에서 발생하는 소성 영역은 기존 연구와 사례에서도 나타나듯이 암주 중앙면의 소성영역이 가장 두껍게 발생하면서 천단부로 갈수록 좁아지는 전형적인 쌍곡면(hyperbolic) 형태의 파괴 형상을 보인다.

Fig. 7은 토피고에 따른 상재압의 비와 암주의 형상비에 따른 암주의 너비와 천장부 너비의 비(w/s)로 나타낸 것이다. 해석결과 암주의 너비와 천장부 너비의 비가 작은 경우(천장부의 너비가 암주의 너비보다 작을 때) 상대적으로 낮은 상재하중 상태에서도 암주의 소성 영역이 먼저 발생하였으며, 암주의 너비와 천장부 너비의 비가 큰 경우(천장부의 너비가 암주의 너비보다 클 때) 상대적으로 높은 상재하중 상태에서

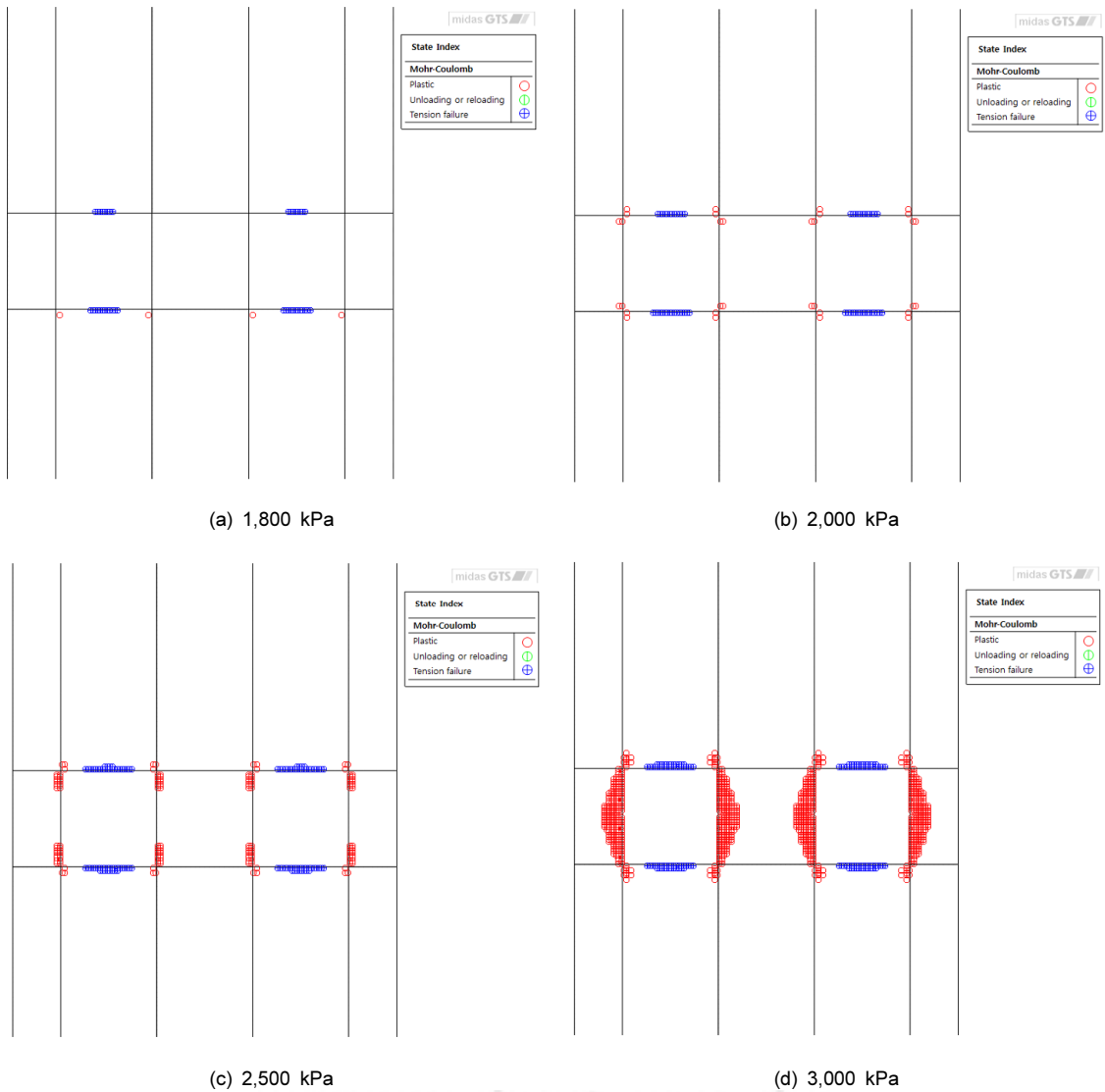


Fig. 6. Tensile failure and plastic state of element at each stage

천장부의 인장 파괴가 시작되었다. 본 해석에서는 암주의 너비와 천장부 너비의 비율이 1.0 이상에서 천장부 인장 파괴가 먼저 시작되었고 그 이하에서는 암주 소성 변형이 먼저 시작되었다. 즉, 주어진 지반 조건에서 천장부의 인장파괴가 발생하기 시작하는 응력 수준에 도달하기 전에 암주 부분에서 먼저 소성 영역이 발생했다고 볼 수 있다. 본 해석결과는 동일한 지반 물성에 대한 해석 결과로, 지반 물성이나 축압과 같은 지반 조건에 따라 초기 이완대의 발생 위치가 나타나는 시점은 다를 수 있으며 이는 설계단계에서 현장 지반 조사를 통해 미리 검토하여 보강 방식과 수준을 주방식 구조 설계에 반영하는 것이 바람직 할 것이다.

기존 주방식 공법의 안정성 해석에서는, 천장부 파괴보다는 주로 암주의 강도 측면에 중점을 두고 연구가 진행되어 왔다. 수치해석적인 연구에서도 암주를 수치적으로 모델링하여 상재하중에 따른 암주의 하중-변위 관계를 토대로 암주의 강도를 추정하는 연구가 주를 이룬다(Murali Mohan et al., 2001; Esterhuizen, 2006; Mortazavi et al., 2009; Wang et al., 2011). 천장부는 경험적으로 록볼트 보강과 같은 지보재를 사용하여 왔으며 지보재의 길이나 간격은 천장부를 단순보로 가정하여 계산한 결과에 근거하였

다. 본 연구에서 나타난 해석 결과와 같이, 천장부의 인장 파괴는 암주의 소성 변이 보다 낮은 상재하중 수준에서도 발생할 수 있으므로 천장부 안정성 검토와 암주 안정성 검토를 동시에 수행하는 것이 합리적인 방안이 될 것이다. 그러나 주방식 공법에서 암주의 경우, 자연상태의 암반을 구조체로 사용하기 때문에 지보재 사용을 최소화하여 암주의 상태를 훼손하지 않는 것이 암주의 강도와 경제적인 측면에서 합리적 이므로, 천장부의 보강을 충분히 검토한 후 상재하중에 따른 암주의 안전율을 산정하는 것이 보다 적합한 방법으로 볼 수 있다. 즉, 상재하중에 따른 천장부 안정성은 암주의 안정성을 검토하기 이전에 사례 연구와 수치해석을 중심으로 적절한 너비(span)를 확보하여 록볼트와 같은 보강 방법으로 천장부 안정성을 확보하고 암주부분의 안정성은 상재하중에 따른 암주의 강도를 비교하는 방식으로 암주와 천장부 안정성을 동시에 검토하는 것이다.

해석 결과에서는 암주와 천장부의 비와 초기 이완대가 발생하는 시점의 관계는 비교적 선형관계로 나타났다. 하지만, 암주의 형상비(w/H)에 따른 차이는 크게 나타나지 않아 기존 주방식 공법 설계가 주로 암주의 형상비에 기반하고 있는 내용과는 큰 차이를

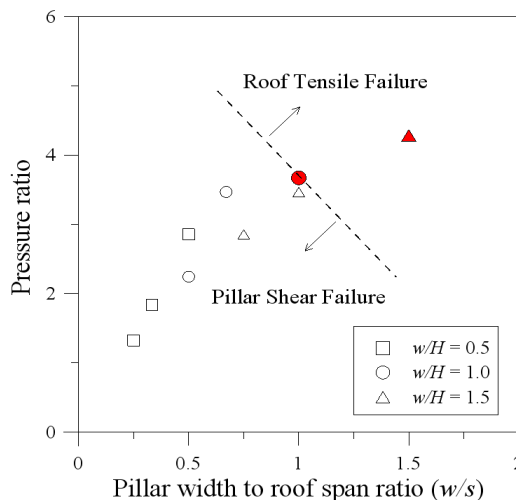


Fig. 7. Pressure ratio at the failure or plastic state

보인다. 따라서, 구조물의 안정성 차원에서 암주의 형상비보다는 천장부와 암주의 너비의 관계가 설계에 미치는 영향이 크다고 볼 수 있으며 이는 천장부와 암주 너비의 비율에 따른 하중 분포가 달라지기 때문으로 판단된다. 이러한 해석 결과는 암반 조건이나 측압 조건이 다를 경우, 해석결과가 상이하게 나타날 수 있으나, 천장부의 인장 파괴가 암석의 일축압축강도에 근거한 암주의 강도(Fig. 1, Table 1 참조)에 비해 상대적으로 낮은 수준의 상재하중에서도 발생할 수 있기 때문에 암주의 강도 판단 이전에 천장부의 해석이 우선되어야 함을 나타내는 결과로 볼 수 있다. 향후 다양한 지반 조건과 암주 형상에 대한 해석적인 검토가 이루어지고, 보강 공법을 포함한 내용이 고려된다면 지반 조건과 암주 형상에 따른 주방식 구조의 안정성을 평가할 수 있는 합리적인 방안이 도출될 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 수치해석을 통하여 주방식 공법에서 구조적 안정성을 평가하기 위한 기초적인 연구를 수행하였으며, 이를 통해 얻어진 주요 결론들을 요약하면 다음과 같다.

1. 지하공간을 활용하는 방안에서 주방식 공법은 기존 광산분야의 공법에서와는 다르게 공간차원에서의 천장부와 측벽 암주부의 안정성이 동시에 연계 고려되어야 하고, 어느 부위이든 불안정성의 유발은 공간 구조의 불안정으로 판단되어야 한다. 이에 설계된 공간 및 암주 단면에 대하여 전체적인 구조 안정성을 검토하여 암주부를 포함해 구조적 안정성 확보 차원에 부합되는 보강안을 설계해야한다. 따라서, 공간차원의 단면설계는 주어진 조건에서 공간부와 암주부의 단면을 연계 검토하여 결정하는 것이 합리적이다.
2. 본 연구에서 적용한 지반 물성 조건과 Mohr-Coulomb

파괴 기준에서는 암주의 너비와 천장부의 너비의 비율에 따라 초기 이완대 발생 위치가 다르게 나타났다. 즉, 암주의 폭에 비해 공간 천장부가 좁으면 암주 천단부나 암주체에서 전단파괴 형태로 파괴가 개시되는 경향이며, 천장부의 폭이 넓어질수록 천장부 중앙에서 인장파괴 형태로 파괴가 개시되는 경향이다. 또한, 주방식 채광 설계법에서는 주요 설계인자로 여겨지는 암주의 형상비(w/H)에 대해서는 구조물 안정성 측면에서는 크게 민감하지 않는 것으로 분석되었으며, 반면에, 암주와 천장부 너비 비율(w/s)이 공간 구조물의 안정성에 민감하게 작용하는 것으로 파악되었으며, 암주와 천장부의 너비 비율에 커질수록 허용 상재하중은 비교적 선형으로 증가하는 경향을 보였다.

3. 암주의 너비와 천장부 너비의 비(w/s)가 작은 경우(천장부의 너비가 암주의 너비보다 클 때) 상대적으로 낮은 상재하중 상태에서도 암주의 소성 영역이 먼저 발생하였으며, 암주의 너비와 천장부 너비의 비가 큰 경우(천장부의 너비가 암주의 너비보다 작을 때) 상대적으로 높은 상재하중 상태에서 천장부의 인장 파괴가 시작되었다.

감사의 글

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

참고문헌

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. Dolinar, D.R. (2003), “Variation of horizontal stresses and strains in mines in bedded deposits in the eastern and midwestern united states”,

- Proceedings of 22nd International Conference on Ground Control in Mining, Morgantown, WV, Aug. 5-7, pp. 178-185.
3. Esterhuizen, G.S. (2006), "Evaluation of the strength of slender pillars", *Trans Soc Min Explor Geol* 320, pp. 69-76.
 4. Esterhuizen, G.S., Dolinar, D.R., Ellenberger, J.L. (2008a), "Pillar strength and design methodology for stone mines", In: *Proceedings of the 27th international conference on ground control in mining*. Morgantown WV: West Virginia University, pp. 241-253.
 5. Esterhuizen, G.S., Dolinar, D.R., Iannacchione, A.T. (2008b), "Field observations and numerical studies of horizontal stress effects on roof stability in US limestone mines", *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 108, No. 6, pp 345-352.
 6. 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.
 7. Gonzalez-Nicieza, C., Alvarez-Fernandez, M.I., Menendez-Diaz, A., Alvarez-Vigil, A.E. (2006), "A comparative analysis of pillar design methods and its application to marble mines", *Rock Mech. Rock Engng.*, Vol. 39, No. 5, pp. 421-444.
 8. 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.
 9. Hartman, H.L., Mutmansky, J.M. (2002), *Introductory Mining Engineering*, 2nd edition, Wiley, New Jersey.
 10. 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.
 11. Hoek, E., Brown, E.T. (1980), *Underground excavation in rock*, Institution of Mining and Metallurgy.
 12. Iannacchione, A.T., Marshall, T.E., Burke, L., Melville, R., Litsenberger, J. (2003) "Safer mine layouts for underground stone mines subjected to excessive levels of horizontal stress", *Mining Engineering*, Vol. 55, No. 4, pp. 25-31.
 13. Kimmelmann, 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.
 14. Krauland, N., Soder, P.E. (1987), "Determinating pillar strength from pillar failure observations", *Eng. Min. J.* Vol. 8, pp. 34-40.
 15. Lee, C., Chang, S-H, Shin, H-S, (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, pp 443-453 (in Korean).
 16. 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.
 17. Mortazavi, A., Hassani, F.P., Shabani, M. (2009), "A numerical investigation of rock pillar failure mechanism in underground openings", *Computers and Geotechnics*, Vol. 36, Issue 5, pp. 691-697.
 18. Murali Mohan, G., Sheorey, P.R., Kushwaha, A. (2001), "Numerical estimation of pillar strength in coal mines", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 38, Issue 8, pp. 1185-1192.
 19. Obert, L., Duvall, W.I. (1967), *Rock mechanics and the design of structures in rock*, Wiley, London.
 20. Ömer, A., Akio, S., Noritoshi, Y., Kenrou, S., Toshikazu, K. (2000) "The characteristics of soft rocks and their effects on the long term stability of abandoned room and pillar lignite mines", *Post Mining 2005*, Nov. 16-17, Nancy, France.
 21. 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.
 22. 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.
23. Shin, Y.-W., Kim, Y.-G. (2010) “Review of mechanical behaviors of pillar in large parallel tunnel”, *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, Vol. 20, No. 3, pp. 131-144 (in Korean).
24. Smith, S. (1990), *Structural stability, support and excavation aspects of mine openings in stratified iron ore deposits*, PhD Thesis, University of Nottingham.
25. Swift, G.M., Reddish, D.J. (2002), “Stability problems associated with an abandoned ironstone mine”, *Bull. Eng. Geol. Environ* 61, pp. 227-239.
26. Wang, S.Y., Sloan, S.W., Huang, M.L., Tang, C.A. (2011) “Numerical study of failure mechanism of serial parallel rock pillars”, *J Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 44, No. 2, pp 179-198.