

TECHNICAL NOTES

국내외 지하광산 갱도설계 현황에 대한 고찰

윤동호, 송재준*

서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부

Review on Design of Underground Mine Openings in Korea and Overseas

Dong-Ho Yoon and Jae-Joon Song*

Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University

*Corresponding author: songjj@snu.ac.kr

Received: February 18, 2019

Revised: February 21, 2019

Accepted: February 22, 2019

ABSTRACT

Some leading countries in mining have a very quantitative guideline for underground mine opening design which is useful to minimize mine hazards such as rockfall and collapse. Those hazards sometimes can cause a huge damage on human life and property in the mines. Construction guidelines of underground mines in Korea consist of qualitative and general expressions although the workers' safety rules and guides are well provided. Recently, mining operations in Korea are going underground due to the environmental regulations and resource depletion at shallow depth, and therefore there is a growing demand on a specialized and systematic guideline for mine opening design securing the underground stability. In this paper, current status of mining industry, research trends, and mining guidelines in Korea and overseas have been reviewed to give an insight into developing a new Korean guideline for underground mine design.

Keywords: Underground mine, Mine opening, Guideline, Rockfall, Underground stability

초록

해외의 일부 광업 선도국에서는 정량적인 설계지침을 제시하거나 별도의 광산 갱도 설계지침을 개발하여 배포함으로써 지하광산 운영 시 대규모 인적·물적 피해로 이어질 가능성이 높은 낙반 및 붕락 재해의 발생을 최소화하기 위해 노력하고 있다. 국내의 경우에는 광산안전기술기준 등 광산개발 관련 지침을 통해 근로자 사고 방지를 위한 안전수칙과 작업지침을 제공하고 있으나, 갱도설계에 대한 부분에서는 정성적이고 불명확한 시공 지침만을 제공하는 데에 그치고 있다. 최근 국내 환경규제 및 천부 자원 고갈로 인해 광산이 점차 심부화되고 있는 추세이며, 갱도의 안정성을 확보하기 위해 정량적인 설계 규격을 제공할 수 있는 전문적이고 체계적인 광산 갱도설계 지침에 대한 수요가 증가하고 있다. 이에 따라 본 원고에서는 국내외 광산 갱도설계 실태와 연구동향 및 현행 설계지침에 대한 현황 조사를 통해 국내 갱도 설계 지침 개발을 위한 사전연구를 수행하였다.

핵심어: 지하광산, 광산 갱도, 설계지침, 낙반·붕락, 갱도 안정성



1. 서론

국내의 경우 산지관리법이나 백두대간 보호에 관한 법률 등의 제정으로 인해 환경 규제가 강화되어 지표의 이용이 제한적이며, 이에 따라 국내 광산 개발 방식은 점차 노천채광에서 갱내채광으로 전환되어 가고 있다(Koo et al., 2008). 또한, 지표면 인근의 부존자원은 이미 대부분 개발이 완료되어 갱내채광 방식의 광산도 개발심도가 점차 심부화 되고 있다. 채광 심도가 증가함에 따라 채광 갱도와 광주에 작용하는 응력의 크기가 증가하므로 갱도 낙반 및 붕락에 따른 안전사고 위험이 증가하고 있다. 한국광물자원공사 통계자료(KORES, 2017)에 따르면, 가행 중인 국내 일반광산 357개(금속: 18개, 비금속: 339개)에서 2016년 한 해 동안 발생한 낙반·붕락 횟수는 총 7회이며, 이는 전체 광산재해 발생 수의 35%에 달한다. 경상자를 제외하고 중상자와 사망자만을 고려하면 점유율은 41%로 상해 위험 및 사고 발생빈도가 가장 높은 재해 유형으로 분류할 수 있다. 이러한 붕락 사고는 주로 적절한 광주 규격의 미확보, 과도한 경간의 무지보 채광장 굴착, 고품위 위주의 선택채광 및 측량 실수로 인한 상하부 편간 광주 불일치 등으로 인해 발생하게 된다. 특히 갱도 붕락과 같은 유형의 안전사고는 사고 발생 시 급진적인 대규모 참사로 이어질 가능성이 높으므로 이를 방지하기 위한 정량적인 설계지침의 개발이 시급한 실정이다. 이에 따라 본 원고에서는 국내외 광산 갱도설계 현황을 고찰하여 나아갈 방향을 모색해 보고자 하였다.

2. 국내 갱도설계 현황

2.1 광산 현황

국내에서는 주로 광산안전관에 의한 정기적인 육안조사나 개별 광산에 의한 자체조사를 통해 지하광산 안정성 평가를 수행해 왔으며, 이상 징후나 사고 발생 시에는 전문가 자문 또는 협동조사를 통해 문제를 사후에 수습하고 있다. 국내 지하광산은 대부분 규모가 영세하여 갱도설계 전문인력을 운용할 여력이 부족하며, 관련 분야의 전문 기술 인력 또한 크게 부족하여 대부분 경험적인 채굴 방법에 의존하고 있는 실정이다(Koo et al., 2008). 국내 지층의 경우 생성연대가 오래되어 습곡이나 풍화가 심하고 대부분의 광종에서 암질과 광물 품위의 편차가 심한 특징이 있다. 이에 따라 영세 광산에서는 광산 개발 시 고품위 위주의 선택채광을 통해 수익성을 확보하고 있으며, 복합적이고 체계적인 설계과정이나 방법을 적용하는 경우가 드물다(Sunwoo, 2018). 이로 인해 Fig. 1의 우측 하단과 같이 불균일한 형태의 채굴적이 형성되어 상부 하중이 불균등하게 분배되므로, 국지적인 응력 집중이나 상하부 편간 광주 불일치 문제가 발생할 수 있다.

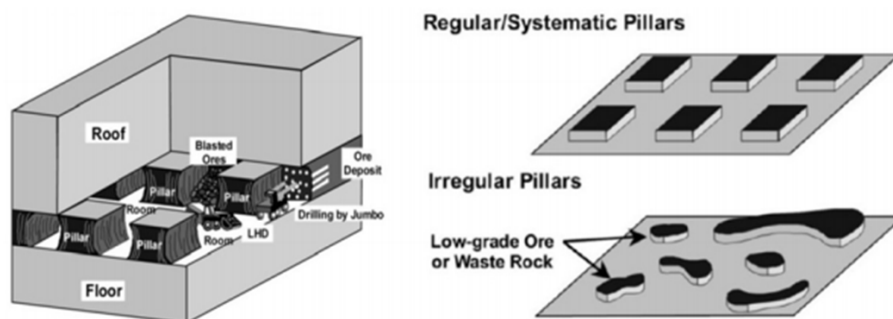


Fig. 1. Irregular shape of pillars produced by selective mining (from Okubo and Yamatomi, 2009)

2.2 연구 현황

국내에서는 광산 갱도 설계와 관련하여 안정성 그래프법(Stability Chart Method)과 한계공동폭(Critical Span)을 이용한 갱도 안정성 평가 연구(Sunwoo and Jeong, 2005; Koo et al., 2008; Jang et al., 2018; Sunwoo, 2018), 지류론에 의한 응력과 광주 강도 추정에 따른 갱도 안정성 평가 연구(Lee et al., 2013; Chang et al., 2014; Jang et al., 2018) 등이 수행된 바 있다. 대부분 특정 사례에 대한 안정성 해석을 통해 유의미한 결과를 제시하였으나, 갱도 배치가 복잡하고 지질 및 암질 변화가 심한 국내 광산에 적합한 실용적이고 정량적인 갱도설계 지침까지는 개발되지 못 하였다.

2.3 설계지침 현황

국내의 경우 광산재해예방매뉴얼(MOTIE and KORES, 2015)에서 낙반 및 붕락에 관련한 내용을 기술하고 있으나 근로자 안전 교육을 위한 개략적 설명과 안전수칙을 제시하는 데에 그쳤다. 2014년 세월호 침몰 사건 이후 안전에 대한 대중의 관심이 집중됨에 따라 2015년부터 정부 주관으로 시행되고 있는 국가안전대진단(Shin and Kim, 2018)의 영향으로 산업통상자원부에서는 기존의 ‘광산보안법’을 ‘광산안전법’으로 개정하고 산업통상자원부 산하에 광산안전위원회를 신설, 민간 전문가로 구성된 위원회가 직접 광산안전기술기준(MOTIE, 2019)을 제정하도록 하였다(Table 1). 한국광물자원공사에서는 광산안전기술기준을 토대로 광산안전규정 표준모델을 광산에 배포하여 광산별 특성을 반영한 자체 안전규정을 제정하게 하였다. 개별 광산의 안전규정은 한국광물자원공사, 한국광해관리공단, 한국지질자원연구원, 대한석탄공사 등 4개의 정부출연기관 중 한 곳에 심의를 신청하여 검토를 받은 후에 광산안전위원회와 산업통상자원부의 승인을 받아 효력을 발생하게 된다.

그러나 최근 제정된 광산안전기술기준 및 광산안전규정에도 구체적인 갱도 시공 규격 등에 대한 지침은 포함되지 않으며 정성적이고 모호한 수준의 갱도 시공지침을 제시하는 데에 그치고 있다. Fig. 2와 같이 대규모 인명 피해나 광산 폐쇄 수준의 막대한 경제적 손실을 초래할 수 있는 갱도 붕락사고를 예방하기 위해서는 국내 실정에 적합한 구체적이고 정량적인 갱도 설계지침을 개발하고 이를 광산안전기술기준 등에 추가하여 관리할 필요가 있다.



Fig. 2. Examples of rockfall and mine collapse (from NIOSH, 2011, CDC, 2019)

Table 1. Guidelines related to mine tunnel design in Korea

Guideline	Mining Accident Prevention Manual (광산재해예방매뉴얼) (MOTIE and KORES, 2015)	Mine Safety Standard (광산안전기술기준) (MOTIE, 2019)
Features	<ul style="list-style-type: none"> • illustrative regulations 	<ul style="list-style-type: none"> • systematic regulations by civilian experts
Limitations	<ul style="list-style-type: none"> • qualitative instructions about rockfall hazard 	<ul style="list-style-type: none"> • ambiguous and subjective construction guideline about rockfall hazard

3. 해외 갱도설계 현황

3.1 광산 현황

전 세계적으로 매우 좋은 암질 조건의 암반에 무지보 갱도를 굴착하여 장기간 운영 중인 사례가 알려진 바 있지만, 모든 암반 조건에서 이렇게 동일한 수준의 갱도 안정성을 확보할 수 있는 것은 아니다. 지보 여부를 결정하는 것은 매우 주관적이므로, 국가별 갱도 설계기준이 상이하하며 현재까지 국제적으로 널리 통용할 수 있을 정도로 우수한 설계기준은 개발되어 있지 않은 실정이다(Hoek et al., 2000). 따라서 국내뿐만 아니라 해외에서도 대부분 숙련된 현장 전임자로부터 전수된 관례, 광산 설계 엔지니어의 경험, 유사한 지질조건을 가진 인근 광산 현장의 갱도 시공 사례 등에 의존하여 광주의 크기, 공동폭, 지보 패턴 등을 결정하고 있다.

이에 반해, 호주나 미국 등 일부 광업 선진국에서는 지하광산 개발 시 급격한 채광 갱도 붕락으로 인한 인적·물적 피해를 예방하고 광업 종사자의 안전한 근로환경을 구축하기 위해 광주와 채광장 규격에 대한 정량적인 설계지침(MCA, 2003, NIOSH, 2011)을 개발하고 민간에 배포하여 이를 광산 갱도설계 및 개발 시에 반영하도록 권장하고 있다.

3.2 연구 현황

해외의 경우, 광산 갱도 안정성 확보를 위해 다양한 연구가 수행된 바 있다. RMR 암반분류법에 따른 터널 폭과 자립시간의 상관관계(Bieniawski, 1976), 광산에 적합한 암반분류법 MRMR의 개발(Laubscher and Taylor, 1976), Stability Chart를 이용한 무지보 채광장의 안정성(Mathews et al., 1980), RMR 값을 통한 지보 하중 계산(Unal, 1983), 절리성 암반블록의 영향을 고려한 갱도설계(Goodman and Shi, 1985), 공동의 등가굴착크기와 Q 값에 따른 영역별 지보패턴 제시(Grimstad and Barton, 1993), 경암 조건에서 갱도 굴착 지보설계량 산정(Hoek et al., 2000), 주방식 채광 시 붕락 예방을 위한 광주 설계(Zipf, 2001), 고지압 비금속광산의 안정성 향상을 위한 갱도 배치 설계(Iannacchione et al., 2003), 비금속광산의 광주 강도와 수직응력에 따른 안정성 평가(Esterhuizen et al., 2011) 등의 갱도설계 관련 연구가 수행되었다. 이 중 일부 연구는 호주와 미국의 갱도 설계지침 개발을 위한 기초자료로 이용되었으며, 유의미한 수준의 정량적인 갱도 설계범위를 제시하고 있다.

3.3 설계지침 현황

호주의 경우, 호주 광산업계를 대변하는 우수한 기업으로 구성된 민간 협회인 호주광업협회(MCA: Minerals Council of Australia)는 서호주 대학교(University of Western Australia)의 Potvin 교수를 필두로 하는 호주지오메카닉스센터(ACG: Australian Centre for Geomechanics) 민간 전문가 위원단에 의뢰하여 ‘낙반 및 붕락 위험 관리지침(MCA, 2003)’을 개발하여 업

계에 배포하고 광산 개발 시에 이를 반영하도록 제안하였다. 해당 지침에서는 공동의 높이나 폭을 굴착목적이나 요구 안정성에 따른 굴착지보지수(ESR: Excavation Support Ratio)로 나누어 계산한 등가굴착크기(D_e , Equivalent Dimension)와 NMT (Norwegian Method of Tunnelling)에서 암반분류에 이용되는 Q 값을 이용한 무지보 한계공동폭 및 지보량 산정 연구(Grimstad and Barton, 1993), 광산암반등급(MRMR: Mining Rock Mass Rating)에 따른 수리반경(Hydraulic Radius)의 경험적 설계 연구(Laubscher, 1990)를 차용하여 Fig. 3과 같은 갱도 설계지침을 제시하였다.

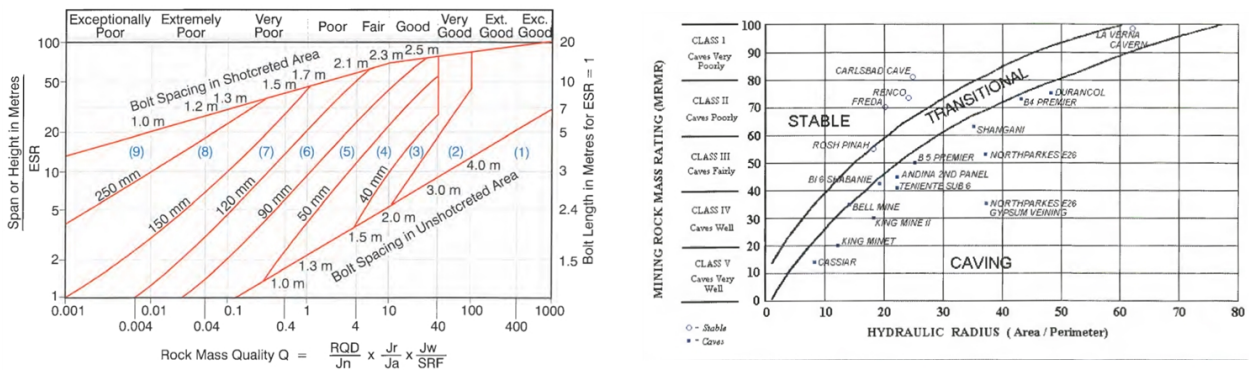


Fig. 3. Guidelines for mine tunnel design in Australia (from MCA, 2003)

미국의 경우 미국질병통제예방센터(CDC: Centers for Disease Control and Prevention) 산하 연구기관인 미국국립산업안전보건연구원(NIOSH: National Institute for Occupational Safety and Health)에서 미국 광산업 종사자의 작업 안전성 확보를 위해 ‘비금속 광산의 광주 및 공동폭 설계지침(NIOSH, 2011)’을 개발하고 업계에 배포하였다. NIOSH 설계 지침에서는 미국 내 34개 비금속 광산에서 조사된 광주 및 공동폭의 실제 성능 현장자료와 수치해석 연구 결과를 종합하여 암반 불연속면의 영향과 광주 형상을 고려한 광주 강도와 지류론법(Tributary Area Method)에 의한 수직응력을 계산하였고 이를 통해 광주 규격 및 안전율 설계 범위를 제시하였다. 또한, 수정 안정성 그래프법(Modified Stability Graph Method) 연구(Mathews et al., 1980; Potvin, 1988; Nickson, 1992; Hutchinson and Diederichs, 1996)를 차용하여 수정 안정성 계수 N' 을 이용해 공동폭을 결정할 수 있도록 정량적인 갱도 설계지침을 제안하였다(Fig. 4).

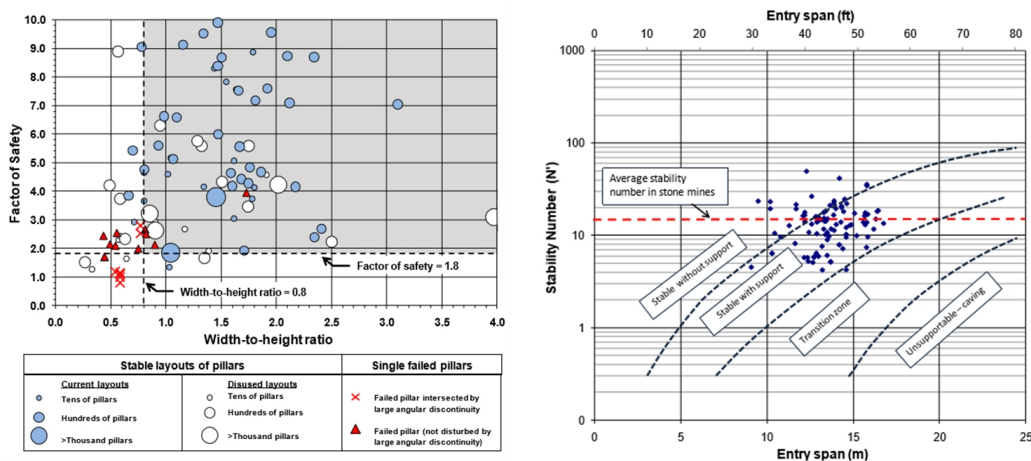
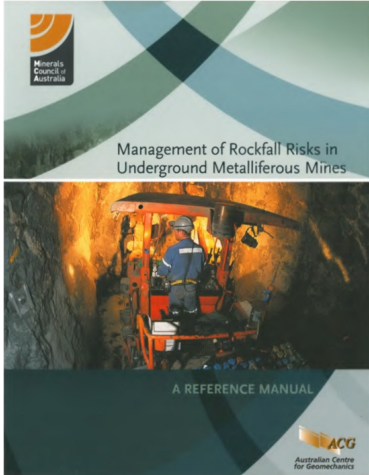
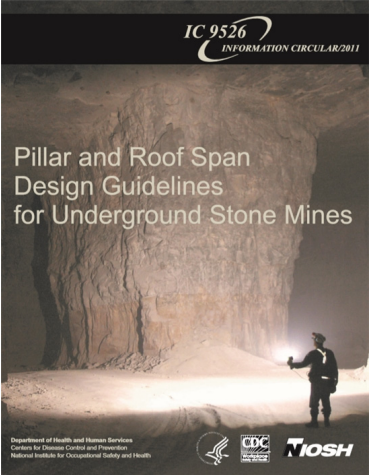


Fig. 4. Guidelines for mine tunnel design in United States (from NIOSH, 2011)

그러나 국내 규정에 비해 정량적인 설계 규격을 제시하고 있는 호주와 미국의 갱도 설계지침 또한 광주 및 채광공동의 불균일한 형상과 복잡한 갱도 배치에 대한 고려가 부족하여 국내 현장 적용 시에 어려움이 있으며, 불연속면의 영향과 암반 장기 거동에 대한 반영이 다소 미흡하므로 여전히 개선의 여지가 남아있다(Table 2).

Table 2. Guidelines related to mine tunnel design in Australia and United States

Country	Australia	United States
Guideline	<p>Management of Rockfall Risks in Underground Metalliferous Mines (MCA, 2003)</p> 	<p>Pillar and Roof Span Design Guidelines for Underground Stone Mines (NIOSH, 2011)</p> 
Features	<ul style="list-style-type: none"> • support requirement estimated by Q-system and ESR • hydraulic radius determined by MRMR 	<ul style="list-style-type: none"> • pillar stress by tributary area method • strength reduction factor considering size effect, aspect ratio, and shape of pillar, and discontinuities • quantitative range of mine pillar design with respect to aspect ratio and FoS • critical span estimated by stability chart method with consideration of roof beam thickness
Limitations	<ul style="list-style-type: none"> • lack of consideration for irregular shape of pillars, openings, and its complex layout • Q value determined in a subjective way • insufficient consideration of discontinuities 	<ul style="list-style-type: none"> • lack of consideration for irregular shape of pillars, openings, and its complex layout • intrinsic error of stability chart method due to the data quality • insufficient consideration of long-term behavior of rock mass

4. 맺음말

해외의 일부 광업 선진국에서는 정량적인 설계지침을 제시하거나 별도의 광산 갱도 설계지침을 개발하여 배포함으로써 지하광산 운영 시 대규모 인적·물적 피해로 이어질 가능성이 높은 낙반 및 붕락 재해의 발생을 최소화하기 위해 노력하고 있다. 그러나 국내의 경우 광산 갱도에 대한 전문적인 설계지침은 아직까지 마련되지 못하였다. 국내 광산 관련 지침에서는 발파 및 통기, 채광 및 운반 등의 작업 시에 근로자의 사고 방지를 위한 안전수칙을 제공하거나 정성적이고 모호한 기준의 갱도 굴착 시공 지침을 제공하는 데에 그치고 있다. 최근 국내 환경 규제 및 천부 자원 고갈로 인해 광산이 점차 심부화되고 있는 추세이며, 이에 따른 갱도 안정성

문제가 대두되어 정량적인 설계 규격을 제공할 수 있는 체계적인 갱도 설계지침에 대한 수요가 증가하고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 국내외 갱도설계 실태와 연구동향 및 현행 설계지침에 대한 현황 조사를 통해 국내 갱도 설계지침 개발을 위한 사전연구를 수행하였다. 미국과 호주 등에서는 낙반과 붕락의 예방을 위한 정량적인 갱도 설계지침을 개발하여 광산 개발에 이용하고 있으나, 현장 적용성이 다소 떨어지는 단점이 있다. 호주와 미국의 갱도 설계지침에서 한 발 더 나아가 국내 실정에 적합한 갱도 설계지침을 개발하고자 한다면 다음과 같은 내용에 대해 심도 있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

- (1) 국내 현장조사를 통한 데이터베이스 구축 및 모니터링
- (2) 광주 및 채광공동 주변 암반 불연속면의 정량화 기법
- (3) 암반의 장기거동 특성에 따른 갱도 주변 응력분포 변화
- (4) 선택채광 적용을 위한 갱도 설계변경과 안정성 확보 방안
- (5) 사용자 편의성을 고려한 갱도 설계지침 개발과 현장 적용성 확보 방안

사사

본 연구는 산업부 지원개발사업 “국내 비금속광산에 대한 국제적인 매장량 평가기준 개발과 이를 이용한 경제성평가 표준화 기법 개발(20172510102340)”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Bieniawski, Z.T., 1976, Rock Mass Classification in Rock Engineering Applications, In Proceedings of a Symposium on Exploration for Rock Engineering, 1976, Vol. 12, 97-106.
- CDC, 2019.02.14., Retrieved from <https://www.cdc.gov/niosh/mining/topics/groundcontroloverview.html>
- Chang, S.H., Lee, C.H., Choi, S.W., Hur, J.S. and Hwang, J.D., 2014, Design of Unsupported Rock Pillars in a Room-and-Pillar Underground Structure by the Tributary Area Method and the Pillar Strength Estimation, Tunnel and Underground Space, Vol. 24, No. 5, 335-343.
- Esterhuizen, G.S., Dolinar, D.R. and Ellenberger, J.L., 2011, Pillar Strength in Underground Stone Mines in the United States. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 48, No. 1, 42-50.
- Goodman, R.E. and Shi, G.H., 1985. Block Theory and Its Application to Rock Engineering, Vol. 26, No. 1, 103-105, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Grimstad, E. and Barton, N., 1993, Updating the Q-system for NMT, In Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete-Modern use of wet mix sprayed concrete for underground support, Fagernes, Oslo, Norwegian Concrete Association.
- Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden, W.F., 2000, Support of underground excavations in hard rock, CRC Press, 137-138, Boca Raton, FL, the United States.
- Hutchinson, D.J. and Diederichs, M.S., 1996, Cablebolting in Underground Mines, Vol. 477, Richmond^ eBC BC: BiTech

Publishers.

- Iannacchione, A.T., Marshall, T.E., Burke, L., Melville, R. and Litsenberger, J., 2003, Safer Mine Layouts for Underground Stone Mines subjected to Excessive Levels of Horizontal Stress, *Mining Engineering*, Vol. 55, No. 4, 25-31.
- Jang, M.H., Ha, T.W. and Jeong, H.S., 2018, Optimized Design of Mine Span Considering the Characteristics of Rockmass in Soft Ground, *Tunnel and Underground Space*, Vol. 28, No. 2, 125-141.
- Koo, C.M., Jeon, S.W. and Lee, I.W., 2008, Underground Mine Design and Stability Analysis at a Limestone Mine, *Tunnel and Underground Space*, Vol. 18, No. 4, 243-251.
- KORES, 2017, 2016 Statistics of Mine Accidents, KORES report, 1-7, Retrieved from https://www.kores.or.kr/hkor/ob/ob07/ob070301/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=11&bbs_cd_n=247¤tPage=1&search_key_n=&search_val_v=&cate_n=&dept_v= (retrieved 2019.02.25)
- Laubscher, D.H. and Taylor H.W., 1976, The Importance of Geomechanics Classification of Jointed Rock Masses in Mining Operations, In *Proceedings of the Symposium on Exploration for Rock Engineering*, Vol. 1, 119-128, AA Balkema, Cape Town, Johannesburg.
- Laubscher, D.H., 1990, A Geomechanics Classification System for the Rating of Rock Mass in Mine Design, *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 90, No. 10, 257-273.
- Lee, C.H., Chang, S.H. and Shin, H.S., 2013, A Study on Conceptual Evaluation of Structural Stability of Room-and-Pillar Underground Space, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 15, No. 6, 585-597.
- Mathews, K.E., Hoek, E., Wyllie, D.C. and Stewart, S.B.V., 1980, Prediction of Stable Excavation Spans for Mining at Depths below 1,000 Metres in Hard Rock, Golder Associates report to CANMET, Department of Energy and Resources: Ottawa.
- MCA, 2003, Management of Rockfall Risks in Underground Metalliferous Mines, Kingston ACT, Australia, 34-55.
- MOTIE and KORES, 2015, Mining Accident Prevention Manual, KORES report, 63-73, Retrieved from https://www.kores.or.kr/hkor/no/no02/no0201/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=14424&bbs_cd_n=5¤tPage=0&search_key_n=&search_val_v=&cate_n=&dept_v=
- MOTIE, 2019, Mine Safety Standard, 20-21, Retrieved from https://www.kores.or.kr/hkor/ob/ob07/ob070301/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=32&bbs_cd_n=247¤tPage=1&search_key_n=&search_val_v=&cate_n=&dept_v=
- Nickson, S.D., 1992, Cable Support Guidelines for Underground Hard Rock Mine Operations, Ph.D. dissertation, University of British Columbia.
- NIOSH, 2011, Pillar and Roof Span Design for Underground Stone Mines, 1-64, Pittsburgh, PA · Spokane, WA, the United States
- Okubo, S. and Yamatomi, J., 2009, *Underground Mining Method and Equipment*, Civil Engineering Vol. II.
- Potvin, Y., 1988, Empirical Open Stope Design in Canada, Ph.D. dissertation, University of British Columbia.
- Shin, J.H. and Kim, S.W., 2018, A study on Issues and Improvements Plan for National Safety Assessment, *Journal of The Korean Society of Disaster Information*. Vol. 14, No. 3, 334-342.
- Sunwoo, C. and Jung, Y.B., 2005, Stability Assessment of Underground Limestone Mine Openings by Stability Graph Method, *Tunnel and Underground Space*, Vol. 15, No. 5, 369-377.
- Sunwoo, C., 2018, Proposal of the Unsupported Span of Openings in the Domestic Underground Limestone Mines, *Tunnel and Underground Space*, Vol. 28, No. 4, 358-371.
- Unal, E., 1983, Development of Design Guidelines and Roof Control Standards for Coal Mine Roof, Ph.D. dissertation, Pennsylvania State University, University Park.
- Zipf, R.K., 2001, Toward Pillar Design to prevent Collapse of Room-and-Pillar Mines. In 108th Annual Exhibit and Meeting, Society for Mining, Metallurgy and Exploration.